EL ÁTOMO INQUIETO Alfred Romer

Este libro es una hermosa y apasionante exposición de los caminos andados y desandados por los pioneros de la física nuclear. Cómo procedieron a desentrañar y relacionar los diversos fenómenos originados en la radiactividad natural de algunas sustancias, cómo aislaron nuevos elementos, cómo fueron adentrándose en la intimidad del átomo y crearon sus primeros modelos, qué experiencias realizaron y cómo las interpretaron, cómo fueron acorralando las soluciones de los diversos problemas. Röntgen, los esposos Curie, Becquerel, Rutherford, Soddy, Geiger, Hahn, Bohr. . ., el tesón, el esfuerzo y el ingenio de esta gran familia aparecen descriptos con lujo de detalles, detalles que a veces sorprenden por su carácter pintoresco. A través de esta obra se tiene, además de un cuadro histórico interesante de por sí, un claro ejemplo del método de trabajo empleado en las ciencias experimentales.



Colección ciencia joven

e u
de bu

11 EL ÁTOMO INQUIETO Alfred Romer

EL ÁTOMO INQUIETO

el despertar de la física nuclear

Alfred Romer

EUDEBA

CIENCIA JOVEN

$ 200.-

EL ÁTOMO INQUIETO

Alfred Romer



EDITORIAL UNIVERSITARIA DE BUENOS AIRES

Título de la obra original:
The Restless Atom

Traducida por
ENRIQUE FERNANDO SAVRANSKY

La revisión técnica estuvo a cargo del traductor y del doctor JOSÉ FEDERICO WESTERKAMP

Primera edición: enero **1962**

Quinta edición: marzo **1977**



EUDEBA S.E.M.
Fundada por la Universidad de Buenos Aires

EDITORIAL UNIVERSITARIA DE BUENOS AIRES - Rivadavia 1571/73
Sociedad de Economía Mixta
Hecho el depósito de ley
IMPRESO EN LA ARGENTINA - PRINTED IN ARGENTINA

La *Colección Ciencia Joven* está constituida principalmente por libros publicados en la *Colección de Estudios Científicos (Science Study Series)*, editada en Watertown, Massachusetts, como parte de un nuevo enfoque de la enseñanza y del estudio de la física.

Estos libros, escritos por autores destacados, ofrecen al estudiante y al público en general una visión de los temas más apasionantes y fundamentales de la física, visión que se extiende desde las partículas más pequeñas hasta el universo en su totalidad. Algunos de los libros exponen el papel que desempeña la física en el mundo del hombre, en su tecnología y en su civilización. Otros son de naturaleza biográfica y narran las fascinantes historias de los grandes descubridores y de sus descubrimientos. Los autores han sido elegidos teniendo en cuenta su competencia en los campos que abarcan y su habilidad para transmitir en forma interesante los conocimientos especializados que poseen, así como sus propias opiniones. El propósito primordial es ofrecer un panorama serio de la física, al alcance del joven estudiante y aun del profano. Es de esperar que muchas de las obras alienten al lector a investigar por sí mismo los fenómenos naturales.

La *Colección de Estudios Científicos* nació en 1956, cuando un grupo de físicos, profesores de escuelas secundarias, periodistas, proyectistas de instrumentos, productores cinematográficos y otros especialistas se reunió en el *Instituto Tecnológico de Massachusetts* (MIT) y organizó la *Comisión para el Estudio de la Física*. Dichas personas aportaron su conocimiento y su experiencia para proyectar y crear medios para el aprendizaje de la física. La *Fundación Nacional para la Ciencia (National Science Foundation)* apoyó inicialmente este esfuerzo y

continuó luego proporcionando su ayuda. También se recibió el apoyo de la *Fundación Ford*, del *Fondo para el Adelanto de la Educación*, y de la *Fundación Alfred P. Sloan*. La Comisión está preparando también películas de divulgación científica, aparatos de diseño especial, una guía de laboratorio, libros de texto y de consulta para profesores. Como puede apreciarse, todo un programa integral para la enseñanza de una ciencia que día a día abre a la humanidad nuevas perspectivas.

La *Colección de Estudios Científicos* está dirigida por un conjunto de personas de reconocida capacidad, entre las cuales hay físicos, escritores, educadores, editores, etcétera, que actúan en representación de importantes instituciones.

Al publicar en castellano los libros de la *Colección de Estudios Científicos*, la Editorial Universitaria de Buenos Aires entiende que ellos pueden servir con eficiencia a los mismos propósitos que motivaron su publicación en el país de origen.

La *Colección Ciencia Joven* se propone, además, suplir en parte la gran escasez, que tanto se hace sentir en nuestro idioma, de buenos libros de extensión y complementación de los conocimientos proporcionados por la enseñanza secundaria. Ello resultará útil tanto para estimular el interés de los estudiantes por la física y las ciencias afines como para descubrir y orientar la propia vocación; en tales aspectos serán un valioso auxiliar del profesor secundario.

Estos libros cumplirán también su cometido entre los estudiantes universitarios de física, ingeniería y otras disciplinas que quieran conocer mejor esa revolución nacida en el seno de la física, que se extiende a otras ciencias y que está cambiando rápidamente la faz y los límites del mundo y nuestra forma de sentir y de pensar.

Prefacio

En física, todo lo que sabemos lo hemos aprendido a través de experimentos, y ni siquiera a través de un pequeño puñado de ellos. Aun detrás de un minúsculo jirón de conocimiento se encuentran docenas y docenas. De entre todos, aquellos de los cuales hemos aprendido más son, en última instancia, los que fracasaron. No siempre fueron experimentos muy bien realizados, no siempre está claro qué se proponía la persona que iniciaba uno de ellos, ni qué hacía cuando lo llevaba a cabo. El hecho importante es que por resultado obtuvo un enigma, y entonces debió pensar, intentar nuevos experimentos, y volver a pensar, para descubrir qué había sucedido en realidad. A medida que sus ideas comenzaron a surgir por sí mismas, pudo ver con mayor claridad qué era lo que debía intentar y cómo debía realizarlo, y, si todo iba bien, podría llevar a término una magnífica obra. Su experimento final, por así decirlo, habría sido espléndidamente planeado, admirablemente realizado, y de significado claro como el agua, y habría conducido exactamente a los resultados previstos. Habría sido una obra maestra, y habría confirmado con certeza lo que de hecho ya conocía, que sus ideas eran, al fin de

Capítulo 1

A modo de comienzo

A principios del nuevo año de 1896, en todos los lugares del mundo la gente abría sus periódicos para leer una pequeña historia proveniente de Viena. La noticia decía que un profesor alemán, llamado Routgen [*sic*], había descubierto un modo de fotografiar objetos ocultos, incluso los huesos del interior de la mano de una persona viva. Era una historia pasmosa, más que nada porque resultó ser cierta. En unas pocas semanas, laboratorios de todos los países comenzaron a realizar fotografías de huesos: huesos de manos y de pies, de brazos y de piernas, y de todo lo que de la anatomía humana podía utilizarse al efecto. Los cirujanos vieron la utilidad de esta singular fotografía, y el profesor Wilhelm Conrad Röntgen, de la Universidad de Würzburg, llegó a ser (una vez corregida la grafía de su nombre) uno de los hombres más célebres del momento.

Lo que nos interesa en este libro es la física atómica, o, en todo caso, una parte de la misma. Se tratará de los átomos que cambian de naturaleza, o sea que, en el antiguo lenguaje de los alquimistas, se transmutan de átomos de un elemento en

átomos de otro. Puede parecer extraño, entonces, haber comenzado con un hecho tomado de la historia de la medicina, pero hay una buena razón por la cual esto es necesario.

No se puede desarrollar una ciencia acerca de algo en lo que no se cree. En 1896 no eran muchos los físicos que creían en los átomos, y ni siquiera uno creía en las transmutaciones. Hubo una época en que éstas parecían ser una cosa razonable, cuando se consideraba que sólo un pequeño cambio en el color hubiera sido necesario para convertir un metal pesado y mate como el plomo en uno pesado y brillante como el oro. El mundo está lleno de cambios más espectaculares. El plomo puede tostarse, convirtiéndose en un polvo amarillo-rojizo y desmenuzable, llamado litargirio; el oro puede ser disuelto en una mezcla apropiada de ácidos. Sin embargo, del litargirio sólo se puede recobrar plomo, y de los ácidos, sólo oro. De un modo u otro, las transmutaciones de los alquimistas nunca fueron muy dignas de confianza, y el sueño de transformar las sustancias de esta manera debió ser abandonado.

En cambio, los nuevos hombres de ciencia (que preferían hacerse llamar químicos) acabaron por considerar al oro, al plomo, al hierro, al azufre, como elementos inalterables: las sustancias básicas a partir de las cuales están constituidas las demás, que en gran cantidad llenan nuestro mundo. A medida que comenzó a crecer el conocimiento de los elementos, la antigua noción de átomo fue vuelta a usar, resultando tan valiosa que, en 1896, cualquier químico hubiera podido proporcionar al lector capítulos enteros de información sobre el modo en que los átomos se comportaban.

Cada elemento (diría uno de aquellos químicos) representaba una única variedad de átomos, y éstos podían combinarse, formando estructuras especiales,

para producir las moléculas de las sustancias más complicadas. Dos átomos de hidrógeno ligados con uno de oxígeno, por ejemplo, originaban una molécula de agua; tres de oxígeno con dos de hierro, una molécula de 'herrumbre'; doce de carbono, veintidós de hidrógeno y once de oxígeno, una molécula de 'azúcar'.

Lo que diferenciaba los átomos de un elemento de los de otro era su comportamiento químico, es decir, el modo de combinarse con los átomos de los otros elementos, y los tipos de sustancias que esas combinaciones producían. Aparte de esto, para cada elemento, los átomos tenían un peso especial y propio.

Esto no significa que se pudiera pesar un átomo individualmente; los átomos eran demasiado pequeños para ser manipulados uno por uno. Pero había experimentos en los cuales se pesaba la cantidad total de diversos elementos combinados entre sí. Cuando se quemaba hidrógeno para obtener agua, 2 gramos de hidrógeno se unían con 16 gramos de oxígeno para formar 18 gramos de agua. Como la molécula de agua contenía dos átomos de hidrógeno por cada uno de oxígeno, esto pareció significar que el átomo de oxígeno era 16 veces más pesado que el de hidrógeno. Cuando se calienta cobre al rojo, se necesitan 63,6 gramos del mismo para entrar en combinación con 16 gramos de oxígeno y formar 79,6 gramos de óxido cúprico puro. Asimismo, con 63,6 gramos de cobre y 32,1 de azufre se obtendrán 95,7 gramos de sulfuro de cobre.

De estos y de centenares de otros experimentos fue posible obtener una serie de números que nos informaban, no del verdadero peso de cada átomo, sino del peso relativo de uno comparado con otro. Si se le asignaba al hidrógeno el número 1, entonces (como se ha visto antes) al oxígeno le corres-

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Li 7,03	Be 9,08	B 10,95	C 12,0	N 14,04	O 16,0	F 19,06	
Na 23,05	Mg 24,3	Al 27,1	Si 28,4	P 31,02	S 32,1	Cl 35,45	
K 39,11 Cu 63,6	Ca 40,1 Zn 65,4	Sc 44,1 Ga 69,9	Ti 48,2 Ge 72,5	V 51,4 As 75,0	Cr 52,14 Se 79,0	Mn 55,0 Br 80,0	Fe 56,0 Co 58,9 Ni 58,1
Rb 85,4 Ag 107,9	Sr 87,6 Cd 112,0	Y 89,0 In 113,9	Zr 90,4 Sn 119,1	Nb 93,7 Sb 120,4	Mo 96,0 Te 127,5	? I 126,9	Ru 101,7 Rh 103,0 Pd 106,4
Cs 132,9 —	Ba 137,4 —	La 138,6 Yb 173,2	Ce 140,2 —	— Ta 182,8	— W 184,4	— —	Os 191 Ir 193,1 Pt 194,9
Au 197,2 —	Hg 200,0 —	Tl 204,1 —	Pb 206,9 Th 232,6	Bi 208,1 —	— U 239,8	—	

pondía el 16, al azufre 32,1 y al cobre 63,6. Estos números eran los pesos atómicos, y cada elemento resultó tener un peso atómico especial y propio.

Esto era suficiente para asignarle importancia al peso atómico; pero, aparte de ello, los pesos atómicos estuvieron implicados en un curioso descubrimiento realizado en 1869 por Dimitri Mendeleiev, de la Universidad de San Petersburgo (hoy Leningrado), en Rusia. Confeccionó una lista de todos los elementos según el orden de sus pesos atómicos, desde el más bajo hasta el más alto, y, al registrarlos en la tabla, encontró que, a intervalos fijos, aparecía el mismo tipo de comportamiento químico. El hidrógeno tuvo que ser puesto aparte, en una clase para él solo, y la lista propiamente dicha comenzaba con el litio, un metal cuyo óxido se disuelve en agua dando un álcali fuerte. Siete elementos más adelante, abajo en la lista, venía el sodio, otro metal productor de un álcali, y siete elementos más allá estaba el potasio, en tercer lugar. Los elementos que seguían al litio, al sodio y al potasio eran, respectivamente, el berilio, el magnesio y el calcio, y estos tres nuevamente formaban un grupo cuyo comportamiento químico era muy similar. En efecto, cuando Mendeleiev dividió su

Fig. 1. *La Tabla Periódica.* Dimitri Mendeleiev (1834-1907), un gran químico ruso, descubrió en 1869 que los elementos conocidos por aquel entonces podían disponerse, siguiendo el orden de los pesos atómicos, en una tabla que reveló una inesperada simetría en los comportamientos químicos. Ésta es la Tabla Periódica en su versión de 1898. Los lugares vacíos en la Tabla condujeron a la hipótesis de que debían existir elementos desconocidos de características apropiadas, y su búsqueda tuvo un papel destacado en el descubrimiento de la radiactividad. En esta tabla los nombres de los elementos se ocultan detrás de los símbolos químicos convencionales.

lista en series de siete, y las colocó en filas paralelas, una debajo de la otra, cada columna contenía un grupo, como el del litio-sodio-potasio, cuyos miembros tenían, en gran medida, el mismo tipo de comportamiento químico. Con los elementos más pesados surgieron complicaciones; fue necesario alternar filas de diez con filas de siete, pero las columnas continuaron ocupadas por elementos que se correspondían (fig. 1).

Para hablar con precisión, esto no es enteramente correcto. En varias partes tuvo Mendeleiev que forzar la correspondencia. En su lista, el elemento que seguía al calcio era el titanio, pero, desde el punto de vista químico, al titanio le correspondía estar debajo del carbono y del silicio; entonces él lo hizo entrar en dicho lugar, inventando otro elemento que llamó 'eka-boro', y que colocó debajo del boro y del aluminio. En la siguiente fila, y después de haber ubicado al cinc en la columna del berilio-magnesio-calcio, llegó al arsénico, que evidentemente caía debajo del nitrógeno, del fósforo, y del vanadio. Fue necesario inventar dos nuevos elementos, el 'eka-aluminio' y el 'eka-silicio', para llenar el espacio intermedio.

Esto ya era suficientemente audaz, pero Mendeleiev fue más allá: describió tales elementos inventados, diciendo cuáles serían sus pesos atómicos y en qué reacciones químicas participarían. Luego, con el correr de los años, estos elementos puramente teóricos fueron apareciendo, uno tras otro, y respondiendo con exactitud a la descripción de Mendeleiev. En 1875, François Lecoq de Boisbaudran descubrió el eka-aluminio y lo denominó galio. En 1879, Lars Fredrik Nilson dio con el eka-boro y lo llamó escandio. Finalmente, en 1886, Clemens Winkler encontró el eka-silicio y lo denominó germanio.

La estructuración de Mendeleiev, su Tabla Periódica de los elementos, se hizo merecedora, entonces, de ser tenida seriamente en cuenta. A menos que una sustancia pudiera ser ubicada dentro de dicho ordenamiento, a menos que su peso atómico y su comportamiento químico concordaran con los correspodientes al lugar de la sustancia en la fila y columna apropiadas, a menos de ello difícilmente podría ser aceptada como elemento respetable.

Ya que los químicos conocían todo esto acerca de los átomos, ¿por qué eran tan escépticos los físicos? Éstos se encontraban muy cómodos con las moléculas; podían imaginarlas firmemente ligadas entre sí para formar sólidos, deslizándose fácilmente unas sobre otras en los líquidos, o errando cada una por separado a través del vacío para constituir los gases. Podían imaginar estas cosas, y de ello pasar a inventar experimentos que comprobaran lo bien que sus ideas concordaban con el verdadero comportamiento de las moléculas. Con los átomos, sin embargo, ninguna idea parecía tener éxito. No había modo de adivinar qué clase de fuerzas los agrupaban en moléculas, ni por qué el oxígeno se combinaba con el hierro y no con el oro. Era imposible imaginar por qué el peso de un átomo habría de ser tan importante, por qué pesos diferentes daban lugar a comportamientos químicos diferentes, y por qué, en las filas y columnas de la Tabla Periódica, un mismo comportamiento químico se presentaba repetidamente.

Pese a todo lo que los químicos sabían, los físicos encontraron pocas cosas acerca del átomo que pudieran tener en cuenta. Parecía no haber modo de encuadrar sus acciones dentro de las leyes corrientes de la física, ni tampoco manera alguna de inventar nuevas leyes para el átomo. Pareció necesario dejarlo totalmente fuera de la física, y lo que se excluye difícilmente puede parecer real.

Muy bien, entonces, la física atómica no podía existir y las transmutaciones resultaban imposibles. ¿Cómo es que, a partir de este estado del pensamiento científico, pudo comenzar una física de los átomos que se transmutan? La respuesta es que ello tan sólo sucedió, que surgió por sí mismo por puro accidente y necesidad de conocer. Alguien notó algo extraño; algún otro, sintiendo curiosidad, investigó. Sin que haya habido una razón particular se fueron amontonando lentamente hechos inexplicables, hasta que un día se hizo visible que la noción de átomos que se transmutan le daría un sentido razonable a todo.

Esto hace que resulte difícil relatar la historia. No comienza en ningún lugar en particular, deambula en direcciones inesperadas, surge en lugares sorprendentes, y nunca parece llegar a algo determinado. Sin embargo, si se la sigue, aceptando los saltos y desvíos tal como se presentan, al final se descubrirá que se ha estado siguiendo el buen camino durante todo el tiempo.

Volvamos a Röntgen. No sabemos cómo dio con 'sus' rayos, pero se trató probablemente de un accidente cuando se ocupaba de alguna otra cosa. El aparato que se necesitaba para producirlos era corriente y fácil de hallar en cualquier laboratorio de universidad. Empleó una bobina de inducción para proporcionar electricidad a alta tensión, un tubo de rayos catódicos a través del cual producir la descarga, y eso era todo. El 'tubo' era simplemente un bulbo de vidrio —que pudo tener forma esférica, de salchicha, o de pera— en el cual se había obtenido un vacío considerable, por bombeo, y que estaba provisto de un par de 'electrodos' metálicos, entre los cuales debía producirse la descarga eléctrica (fig. 2).

Fue en uno de estos electrodos, el 'cátodo', desde

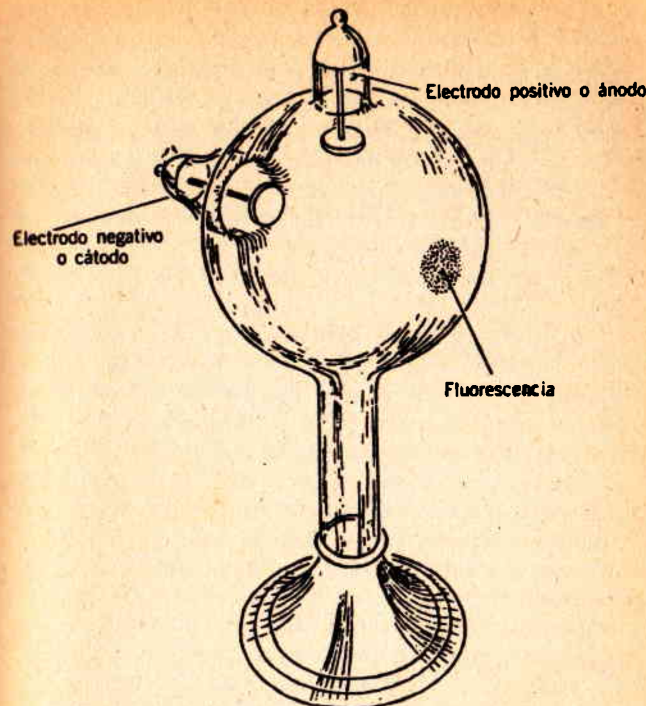


FIG. 2. *Un sencillo tubo de rayos catódicos.* El tubo es un bulbo de vidrio en cuyo interior se ha hecho el vacío, y a través de cuya pared de vidrio han sido fijados herméticamente un electrodo negativo, o 'cátodo', y un electrodo positivo, o 'ánodo'. La ubicación del ánodo no es importante. Cuando se aplica una tensión considerablemente alta, los rayos catódicos, que son haces de electrones, surgen del cátodo formando ángulos rectos con su superficie. En el lugar en que se encuentran con la pared de vidrio se produce una fluorescencia.

el cual la electricidad negativa se proyectaba hacia el tenue gas que quedaba en el tubo, donde los rayos catódicos surgieron a la vida, y se alejaron formando

ángulos rectos con su superficie. Si las paredes del tubo se encontraban suficientemente próximas al cátodo para ser alcanzadas por los rayos, entonces por acción de éstos las paredes se iluminaban con una fluorescencia, que era de color verde en los tubos hechos de vidrio cálcico inglés, y azul en los de vidrio plúmbico alemán. Aquí, en la fluorescencia, era donde se producían los rayos X de Röntgen.

No obstante haber sido el primero en observarlos, el mérito de Röntgen consistió en haber investigado. Descubrió dónde se producían, cómo se desplazaban en línea recta, cómo podían producir fluorescencia en un compuesto particular, llamado platinocianuro de bario; cómo atravesaban algunos materiales y eran detenidos por otros, de modo que objetos familiares proyectaban sombras muy extrañas sobre la fluorescencia originada por los rayos X. Descubrió que podían impresionar una placa fotográfica (la película fotográfica ya había sido inventada, pero para trabajos serios se preferían las placas de vidrio), y fotografió las sombras, obteniendo nuevas y extrañas imágenes del interior de las cosas. Trabajó con la máxima velocidad durante los últimos dos meses de 1895, y por Navidad se sintió en condiciones de hacer un anuncio.

En ciencia se admite que la primera persona que hace público un descubrimiento puede reclamar el reconocimiento de haberlo realizado. No puede, sin embargo, reivindicar más que lo que anuncia, y, una vez anunciado, su descubrimiento queda ligado a su nombre, justa o injustamente, para siempre. Röntgen estaba ahora seguro de lo que conocía, y eligió el más rápido de los caminos para poder publicarlo. Había en Würzburg una sociedad científica que se reunía para la lectura de 'memorias' o 'comunicaciones' (como se llaman generalmente a los

informes de investigación) y las publicaba posteriormente en sus *Actas*. El sábado siguiente a la Navidad, Röntgen visitó al secretario de esta sociedad, el cual aceptó su memoria y la envió al impresor para que la pusiera en letras de molde y la imprimiera inmediatamente en forma de un folleto de diez páginas. El día de Año Nuevo, Röntgen envió, por correo, copias de su folleto a los principales físicos de Europa; en cada uno de los sobres había introducido una cantidad de fotografías que él había tomado, las primeras del mundo realizadas con rayos X. Gracias al folleto enviado a Viena la noticia llegó a los periódicos, y así fue como este descubrimiento realizado en Alemania se dio a conocer primero en Austria.

Capítulo 2

Los rayos penetrantes de Henri Becquerel

Nos ocuparemos, sin embargo, de la copia del folleto de Röntgen que llegó a París para el físico-matemático Henri Poincaré. En París estaba la *Académie des Sciences*, cuyos setenta y ocho miembros eran los más distinguidos científicos de Francia, y que estaba situada en el centro de toda la ciencia francesa. Se reunía los lunes para la lectura de memorias (las cuales publicaba dentro de las dos semanas), y allí, en la tarde del 20 de enero de 1896, los académicos tuvieron el placer de ver la primera radiografía francesa de los huesos de una mano, obra de dos físicos llamados Oudin y Barthélemy. Las fotografías llevaron a una conversación, y de ésta surgieron preguntas, que Poincaré, por supuesto, pudo responder.

Entre los oyentes curiosos se encontraba Henri Becquerel, académico como su padre y su abuelo, y también, como ellos, profesor de física en el Museo de Historia Natural. Lo que le interesaba era la información de que los rayos X surgían de la mancha fluorescente que se formaba sobre la pared del tubo de rayos catódicos. La fluorescencia producida por la luz era uno de los efectos que su padre había investigado, y él mismo había trabajado algo en ello. Si la fluorescencia de los rayos catódicos contenía rayos X, entonces éstos podrían también producirse en otras variedades de fluorescencia..

Así fue como la publicación de Röntgen cumplió su cometido. Había proporcionado una nueva idea a una persona completamente desconocida por él. Y Becquerel regresó al Museo para poner su idea a prueba.

Durante un mes no encontró nada, y entonces acertó a elegir como material fluorescente, para una nueva serie de experimentos, algunos cristales de sulfato de uranilo y potasio. Éste es un complicado compuesto de potasio, uranio, oxígeno, y azufre, cuyos cristales resplandecían bajo la luz ultravioleta (cosa que él sabía por experiencia personal). Para detectar los rayos penetrantes, en lo cual tenía ahora esperanza, usó una placa fotográfica envuelta en un papel negro grueso, para protegerla de la luz común. Eligió la luz solar para que sus rayos ultravioleta produjeran la fluorescencia de los cristales, y colocó las placas en el exterior de su ventana, con los cristales colocados sobre la envoltura de papel. Horas más tarde las retiró, y al revelarlas bajo la luz roja de su cuarto oscuro tuvo la satisfacción de ver las marcas borrosas que surgían lentamente sobre las superficies cremosas de las placas, en los lugares en que había estado colocado algún cristal.

Ensayó nuevamente, colocando debajo de cada cristal una moneda o un trozo de metal atravesado por agujeros, y ahora pudo ver contornearse dichos objetos de metal, en forma de manchas claras sobre el gris circundante, más oscuro. En un tercer ensayo, colocó cada cristal sobre un trozo de vidrio delgado, para que actuara como barrera contra los vapores que el calor solar podía haber forzado a

través de los poros del papel, ennegreciendo la placa por acción química. Una vez más las placas se ennegrecieron como si el vidrio no hubiera estado, y Becquerel confiaba haber encontrado una radiación penetrante producida por la luz. El 24 de febrero, en la siguiente sesión de la *Académie*, hizo el anuncio.

Nótese con qué limpidez se desarrolló todo. Becquerel había hecho la hipótesis de que los rayos X eran una parte normal de la fluorescencia. La hipótesis había sugerido un experimento, y éste había dado exactamente los resultados que él había predicho. Era un trabajo científico todo lo trivial y engañoso que se podía pedir. Afortunadamente, Becquerel prosiguió con nuevos experimentos, y aún antes de que su comunicación apareciera impresa, había aprendido mucho más sobre 'sus' rayos, y estaba mucho más asombrado.

En los tres días siguientes, el tiempo cambió. Las placas del miércoles estaban apenas listas cuando las nubes cubrieron el sol, y las placas, el papel negro, los cristales, y todo, fueron a parar a un cajón. Allí se quedaron, en la oscuridad, hasta el domingo; y en la oscuridad, como Becquerel sabía, nada podía pasar. El sulfato de uranilo y potasio sólo resplandecería al incidir sobre él la luz ultravioleta; al cesar dicha luz, la fluorescencia cesaba en menos de una centésima de segundo. Aun así, al llegar el domingo, Becquerel, con una especie de impaciencia metódica, sacó las placas que no habían sido usadas y las reveló de todos modos. Lo que apareció ante sus ojos fueron manchas mucho más negras que las que ya había visto. Los cristales parecían emitir sus rayos aun en ausencia de luz, y cuando repitió una vez más los experimentos en la oscuridad total de su cuarto oscuro, halló que esto era cierto.

Era cierto e inexplicable, y todo lo que pudo hacer fue investigar. Apartó algunos cristales en la oscuridad, para ver cuánto tiempo le llevaría a sus rayos penetrantes el extinguirse. En todas las ocasiones en que los sometió a prueba, durante las horas, días, y semanas que siguieron, siempre había rayos que brotaban vigorosamente. Ensayó otros materiales fluorescentes, y siempre que contenían uranio encontró 'sus' rayos, pero no cuando estaban constituídos por calcio o cinc. Ensayó compuestos de uranio que no eran fluorescentes, y, asombrosamente, en ellos los rayos se presentaron una vez más.

Lo enigmático de todo esto era la energía que estaba en juego. Para impresionar las placas fotográficas se requería energía, que los cristales habrían almacenado de algún modo. Becquerel hubiera deseado conocer de qué manera la energía ingresaba al cristal, y qué era necesario hacer para inducirlo a comenzar la emisión, pero ninguno de los cristales que él poseía parecía estar en condiciones de ser agotado. Encerrado en su cuarto oscuro, ensayó el recurso de calentar suavemente un cristal de nitrato de uranilo hasta que las moléculas de agua incorporadas a su estructura fueran liberadas por el calor, y, finalmente, el cristal se disolviera en su propia 'agua de cristalización'. Era dable esperar que ello liberaría toda la energía almacenada, pero al enfriarse el tubo de ensayo y volver a cristalizar el nitrato de uranilo, en la oscuridad, recobró su poder de emitir rayos. En realidad era más correcto decir que lo conservaba, ya que al poco tiempo Becquerel descubrió que los rayos surgían de la solución tan espontáneamente como de los cristales sólidos.

El único factor constante en todos sus experimentos era la presencia del uranio. Siempre que su material contuviera uranio, no tenía importancia si era fluorescente o no, si estaba expuesto a la luz

o en la oscuridad, si era sólido o estaba en solución. A Becquerel le pareció que valía la pena probar si el uranio puro, metálico, también producía rayos. Uranio puro no existía, pero sucedió que Henri Moissan, de la Escuela de Farmacia de París, se ocupaba por aquel entonces de un nuevo proceso para su refinación. Becquerel esperó, y, al tener éxito Moissan en los comienzos de mayo, hizo la prueba con un disco de uranio metálico puro, sin combinar. Sus rayos eran más intensos que cualesquiera otros que él hubiera visto.

Era verdad, y sin embargo, totalmente extraño (como él lo señaló), que un metal puro tuviera el poder de emitir rayos desde alguna fuente desconocida de energía almacenada.

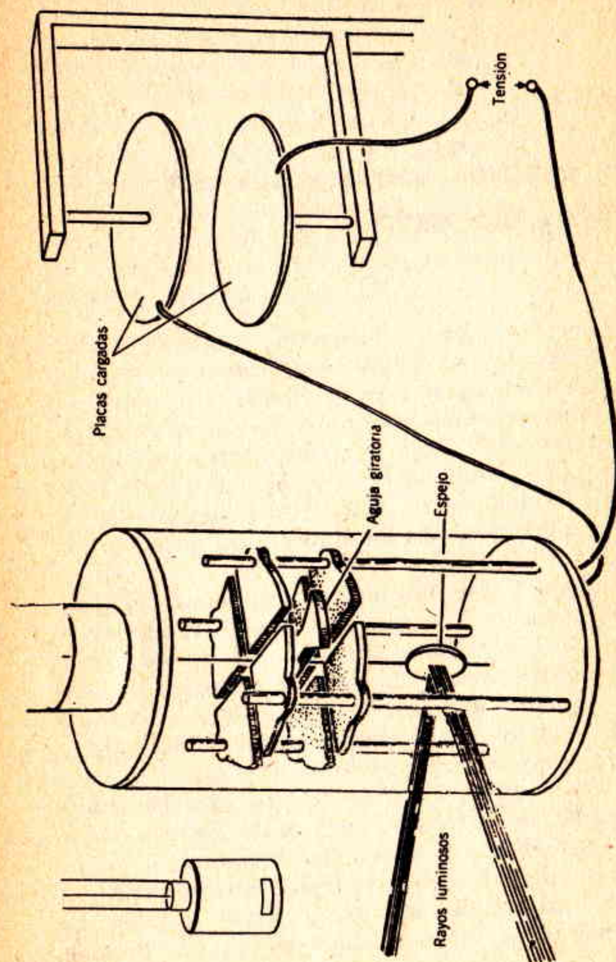
Capítulo 3

Los esposos Curie y sus dos nuevos elementos

Como los rayos de Becquerel no permitían obtener fotografías de los huesos, no eran, ni de lejos, tan fascinantes como los de Röntgen, y nadie más vio algún provecho en estudiar los misteriosos rayos penetrantes del uranio. Probablemente ésta fuera la razón por la cual, en las postrimerías de 1897, llamaron la atención de Marie Curie, después de haber quedado descuidados durante casi un año y medio.

Madame Curie, hija de un profesor de matemática y física de Varsovia –en lo que era la Polonia rusa–, había iniciado su vida con el nombre de Marya Sklodowska. Una pujante ambición de estudiar aquellas materias la había llevado a París, donde obtuvo sus licenciaturas en la Sorbona, y donde conoció a Pierre Curie, con quien se casó. Éste era profesor de física en una escuela técnica sostenida por la ciudad de París, la Escuela Municipal de Física y Química Industriales.

Ahora, después del nacimiento de su primera hija, Marie Curie estaba ansiosa por seguir adelante. La próxima etapa sería el doctorado, y, en Francia,



ello exigía un largo y elaborado trabajo de investigación. Un tema en el cual nadie más estaba interesado le permitiría hacer un proyecto ideal, ya que había poco peligro de que un competidor desconocido, en algún otro laboratorio, pudiera resolver antes los mismos problemas.

Ella no proyectaba trabajar mediante la fotografía, como había hecho Becquerel, sino detectar los rayos por medio de otra propiedad que éste había descubierto. Se trataba de su curiosa capacidad para descargar cuerpos cargados eléctricamente. Era co-

---

FIG. 3. ***El electrómetro de Pierre Curie.*** Con este aparato, Marie Curie midió la intensidad de los rayos emitidos por minerales de uranio y por la pecblenda. El dispositivo de la derecha, un tipo de colector de iones, consistía en dos placas aisladas sobre una de las cuales, la inferior, estaba esparcido el material emisor. El instrumento de medición propiamente dicho, centro e izquierda, tenía ocho placas de metal con forma de cuarto de círculo, fijadas a varillas aisladoras, de modo de formar cuatro cuadrantes. Entre los conjuntos superior e inferior de placas en forma de cuarto de círculo se encontraba una delgada aguja de aluminio, suspendida de un fino alambre que pasaba por el interior de un tubo de vidrio, y que podía girar libremente. En el extremo del alambre situado debajo de la aguja había un pequeño espejo, que giraba al hacerlo la aguja. La luz reflejada por el espejo evidenciaba la magnitud de la rotación. Una batería de alta tensión permitía cargar la placa inferior, aislada, del dispositivo de la derecha. Los rayos provenientes del material colocado sobre dicha placa permitían el flujo de la corriente hacia la placa superior, que estaba conectada a un par de cuadrantes del instrumento de medición. La aguja de aluminio se cargaba, a través del alambre, por medio de otra fuente, y al ser atraída o repelida por los cuadrantes cargados, se desviaba lateralmente. La magnitud de la desviación se medía por medio del movimiento de la luz reflejada por el espejo.

mo si los rayos se las arreglaran para transformar de aislador en conductor el aire que atravesaban, y en este efecto vio, Marie Curie, la posibilidad de estimar su intensidad. Para lograrlo, necesitaba medir corrientes sumamente débiles, y para ese trabajo poseía un instrumento excelente: un electrómetro perfeccionado, que había sido diseñado por Pierre Curie y su hermano Jacques (fig. 3).

Comenzó con el disco de uranio metálico de Moissan, y trató, como Becquerel, de encontrar la fuente de su energía; pero ni el calentamiento del disco, ni ninguna exposición a la luz o a los rayos X, condujeron a alterar la intensidad de sus rayos. Finalmente, en febrero, se decidió por algo nuevo. Becquerel había demostrado que los rayos surgían del uranio en cualquier estado. Marie Curie pensó que la emisión de rayos podía ser un poder compartido con otros metales, y comenzó una búsqueda que prosiguió, más y más, sin ningún éxito particular. A veces ensayó metales puros; otras, minerales tal como llegaban de la mina, o compuestos cuidadosamente purificados por el fabricante de productos químicos. Una y otra vez no encontró nada, con la única extraña excepción de la pecblenda.

La pecblenda es un mineral de uranio, pero como el uranio tenía que compartir con el oxígeno el espacio interior de los cristales, por no mencionar una cantidad de variadas impurezas, resultó de lo más sorprendente descubrir que emitía rayos con una intensidad considerablemente mayor que el metal puro. Marie Curie realizó una larga serie de mediciones sobre compuestos purificados de uranio, y sólo halló lo que se podía haber esperado: que cuanto más 'diluido' se encontraba el uranio en otros elementos, tanto más débiles eran los rayos. Sin embargo, los minerales de uranio emitían, con entera regularidad, rayos muy intensos. Era posible que

la compleja estructura cristalina de un mineral pudiera intensificar de algún modo la emisión de rayos, pero éste era un argumento poco convincente, que ella procedió a demoler preparando calcolita (fosfato de uranilo y cobre) artificial, basado en reactivos puros de laboratorio. El uranio que ésta contenía no emitía rayos más intensos en la forma cristalina del mineral que en los frascos en que se lo guardaba en los estantes, y la imitación resultó más débil que la calcolita natural.

Esto hizo crecer la posibilidad de que fuera una impureza de los minerales la que proporcionaba los rayos excedentes, pero cuando Marie Curie recorrió la Tabla Periódica de cabo a rabo, tan sólo pudo encontrar dos elementos emisores de rayos, uranio y torio... y no había nada de torio en los minerales que ella estaba ensayando. ¿Podría la impureza ser un elemento aún sin descubrir?

Aunque Marie Curie no había enunciado el argumento en la memoria en que informaba de todo esto, cuya lectura en la *Académie* fue hecha por el profesor Gabriel Lippmann, de la Sorbona, el mismo se hacía harto evidente para todo aquel que observara la Tabla Periódica. El galio, el escandio, y el germanio no habían, en modo alguno, llenado los claros. Había un grupo particularmente impresionante, situado entre el bismuto, cerca del comienzo, y el uranio y el torio, en el mismísimo final. Estos dos metales pesados, con nombres fantásticos de dioses olvidados, eran los dos únicos emisores de rayos entre todos los elementos conocidos. De existir un elemento desconocido, y además emisor de rayos, podría haber llenado uno de los claros vecinos a aquellos dos.

La aislación de un nuevo elemento era una tarea

para un químico, para un químico experimentado que conociera íntimamente todas las variedades de comportamiento de todos los elementos conocidos. Ni Marie ni Pierre Curie eran químicos, y Gustave Bémont, el hombre al que habían recurrido en busca de consejo, era tan sólo instructor de laboratorio en la Escuela Municipal. Aun así, el elemento que buscaban sería fácil de encontrar. Debía ser emisor de rayos, y con sólo diferir del uranio y del torio sería nuevo.

Pierre Curie había sido atraído gradualmente por las mediciones electrométricas y por todos los enigmas que hacían surgir, y ahora ocupaba su lugar como participante, en igualdad de condiciones, en la búsqueda del nuevo elemento. Juntos, los Curie molieron finamente cierta cantidad de pecblenda, la disolvieron en ácido, y pusieron manos a la obra. Tenían que separar los diversos elementos que podía haber en el mineral, y el recurso favorito para esa separación era el filtro. Siempre que a partir del mineral pudieran llegar a obtener una mezcla fangosa formada por un líquido y los granos sin disolver de alguna sustancia, podrían verter la mezcla en un cono de papel colocado en un embudo de vidrio. Entonces el líquido rezumaría a través de los poros del papel, y se escurriría, en tanto que los granos sin disolver, atrapados, quedarían retenidos. Esto permitiría obtener dos cosas diferentes en dos lugares diferentes, y con ello se habría comenzado a separar los componentes de la mezcla.

Por ejemplo, cuando los Curie hacían burbujear, dentro de la solución de pecblenda el desagradable pero muy útil gas llamado sulfuro de hidrógeno, éste reaccionaba con unos pocos metales, quizá cinco, formando sulfuros insolubles que 'precipitaban' en forma de una masa viscosa que podía separarse por filtración. Aquí no había ni uranio ni torio, pero, no obstante, en el papel de filtro se manifestaba una actividad emisora de rayos —que ellos comenzaron a llamar 'radiactividad'—; los Curie sabían que estaban sobre la pista. Después de esto, no era más que asunto de rutina volver a disolver, precipitar, y filtrar, hasta que los cinco diferentes metales hubieran ingresado en cinco platillos distintos. De este modo descubrieron que la sustancia radiactiva acompañaba al bismuto.

No podía ser bismuto, porque sabían (y se habían asegurado nuevamente) que el bismuto no era radiactivo. Entonces, después de haber experimentado un poco, encontraron una manera de separar el bismuto y la sustancia radiactiva. Para ello formaron nuevamente los sulfuros de ambas sustancias, y encerraron la mezcla herméticamente dentro de un tubo de vidrio resistente en cuyo interior habían hecho el vacío. Al ser calentado intensamente, el material radiactivo se evaporaba dejando tras de sí al sulfuro de bismuto, y condensándose en el extremo más frío del tubo, donde formaba una mancha oscura.

Esto era demasiado poco para seguir adelante, pero parecía estar claro que la sustancia radiactiva no era ni uranio, ni torio, ni bismuto. Además, pudo demostrarse que era un elemento, y en su informe (cuya lectura estuvo esta vez a cargo de Becquerel) proponían llamarlo polonio.

Posiblemente fuera un sentimiento alocado el que los movió a darle por nombre, a un elemento, el de un país desaparecido. Tiempo atrás, el reino de Polonia había sido dividido entre Austria, Rusia, y Prusia, y no parecía haber perspectivas de que los tres poderosos imperios que regían sus fragmentos pudieran desintegrarse alguna vez, dejándolos en

libertad. Sin embargo, aún en vida de Marie Curie, esta misma especie de obstinado y romántico patriotismo logró, de hecho, hacer renacer una nación polaca.

La radiactividad del polonio asociada al bismuto no era, sin embargo, la única radiactividad que los Curie hallaron en su pecblenda. Había otra, que acompañaba al bario, y ésta se rindió a un proceso de separación química. El recurso consistía en formar cloruros con el bario y el nuevo elemento, disolver en agua la mayor cantidad posible de los cloruros mezclados, y luego verter alcohol puro en la solución saturada. Esto hacía aparecer parte del material disuelto en forma de un precipitado blanco, que podía separarse por filtración; el 'filtrado' claro, que se había escurrido hacia abajo, podía ser evaporado para recuperar el resto. Al comparar estas dos porciones, siempre había más radiactividad en el precipitado que en el material que había permanecido en solución.

Se trataba sólo de una separación parcial, pero, realizándola una y otra vez, los Curie pudieron concentrar más y más cantidad del material activo en una muestra cada vez menor, hasta que, finalmente, obtuvieron una escasa pizca de polvo blanco. Esta preciada cantidad era novecientas veces más radiactiva que el mismo peso de uranio metálico.

Para demostrar que esta nueva sustancia era un elemento, los Curie debían encontrarle un peso atómico, y esto significaba tener que acumular una cantidad suficiente para medir. El día en que podrían lograrlo pertenecía aún al futuro, pero en el ínterin pudieron darse alguna idea teniendo en cuenta el espectro de la sustancia.

El 'espectro' es un tipo de luz atómica característica. Si se hace evaporar una sustancia por acción de

una llama intensa o de una chispa eléctrica, y si los átomos de la sustancia tienen energía suficiente como para comenzar a irradiar por sí mismos, entonces la luz que emiten está coloreada, y ello de un único modo. Cuando se dispersa esta luz con un prisma, no se ve una banda continua de tonos que se interpenetran y que se distribuyen entre el rojo y el violeta, sino un espectro de líneas nítidamente definidas, angostas, y de colores brillantes, separadas por amplias zonas de absoluta oscuridad. Para cada elemento diferente el espectro también lo es, y aunque para una mezcla de elementos los espectros se vuelven intrincados, un experto puede distinguir uno del otro con un poco de cuidado y paciencia.

En París había uno de tales expertos, Eugène Demarçay, un químico a quien, ya antes, Marie Curie había pedido prestadas muestras de algunos de los elementos más raros para ver si eran radiactivos. A medida que obtenían más concentrado su material, los Curie continuaron llevándolo a lo de Demarçay. En el espectro del último y más activo espécimen encontró, en la región del ultravioleta, una única línea que no pertenecía ni al espectro del bario que componía el grueso del material, ni al platino de los alambres entre los cuales se producían las chispas, ni tampoco al espectro de algún elemento conocido.

Ante esta evidencia, sobre la base de la radiactividad de su sustancia, de su separación parcial del bario, y de su única línea espectral, los Curie anunciaron su segundo nuevo elemento en los últimos días de 1898, y, debido a la gran intensidad de sus rayos, lo llamaron radio.

Entonces fue hora de comenzar nuevamente. Los Curie no estaban en condiciones de encarar la compra de más cantidad de pecblenda, pero, afortunada-

mente, encontraron un sustituto más barato. Por intermedio del gobierno austríaco obtuvieron, como obsequio, algunos centenares de kilogramos de residuos provenientes de la refinería de uranio de Joachimsthal, en Bohemia. (En la actualidad se llama Jáchimov, y está en Checoslovaquia.) Por supuesto que ese polvo pardusco mezclado con agujas de pino no contenía uranio, pero lo que los Curie necesitaban era el radio. Volvieron otra vez a su química, a disolver y precipitar, y nuevamente a disolver. Resultó muy afortunado el hecho de que no repararan en que los kilogramos de residuos se habrían de convertir en toneladas antes de poder ellos reunir una cantidad ponderable de cloruro de radio.

Capítulo 4

Ernest Rutherford y las radiactividades temporarias

El lector ha encontrado el uranio en manos de Becquerel, y el polonio y el radio con los Curie, pero hasta ahora ha oído poco acerca del torio, el cuarto elemento radiactivo. Era el 26 de diciembre de 1898, cuando Becquerel informó a la *Académie des Sciences* del descubrimiento del radio por los Curie, y precisamente en esa época el torio estaba siendo investigado, en una región del globo enteramente distinta, por R. B. Owens, profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de McGill, en Montreal.

Owens, que en McGill sería considerado un yanqui (pese a haber nacido en Maryland), había llegado allí ese mismo otoño desde la Universidad de Nebraska, donde había tenido un puesto. Tenía veintiocho años, y prontamente se convirtió en amigo de otro recién llegado y coetáneo: Ernest Rutherford, un profesor de física de veintisiete años de edad Fue Rutherford quien le había sugerido el estudio del torio, y eran los métodos de Rutherford los que estaba siguiendo en su trabajo.

Tendremos que presentar a Rutherford con un poco más de formalidad. Había llegado de Nueva Ze-

landia, donde se había erigido a sí mismo en algo así como un prodigio. Al graduarse en el *Nelson College* (el equivalente a una escuela preparatoria norteamericana) ganó premios no sólo en matemática, física y química, sino también en latín, francés, literatura e historia inglesas. Su hoja de servicios universitaria, en el *Canterbury College*, fue igualmente notable. Obtuvo un 'grado' tras otro, y los experimentos sobre magnetismo que comenzó en el cuarto año le valieron, a fines del quinto, una beca de investigación para la Universidad de Cambridge. En el otoño de 1895 llegó a Cambridge, para ingresar al Laboratorio Cavendish, y ya había comenzado a formarse un prestigio cuando, unos meses después, irrumpió la conmoción de los rayos X.

En los comienzos de febrero de 1896, el profesor J. J. Thomson, director del Laboratorio Cavendish, descubrió que los rayos X podían convertir en conductor de la electricidad el aire que atravesaban. Como los gases conductores eran una de sus especialidades, creyó comprender cómo podían actuar los rayos X. Las investigaciones que comenzó se desarrollaron bien. Después de dos meses, para acelerar el trabajo, designó a Rutherford su asistente personal, y, al terminar el verano, los dos tenían una buena noción general de lo que sucedía. Entonces dividieron sus fuerzas para resolver detalles.

Al irse desarrollando sus ideas durante el año y medio siguiente llegaron a representarse el proceso de este modo: Cuando un haz de rayos X pasaba a través del aire (o de algún otro gas), los rayos podían, aquí y allá, extraer de una de las moléculas una minúscula partícula cargada con electricidad negativa. (Cuando Thomson descubrió estas partículas, en parte por medio de la investigación, las llamó corpúsculos, pero después de entonces han recibido el

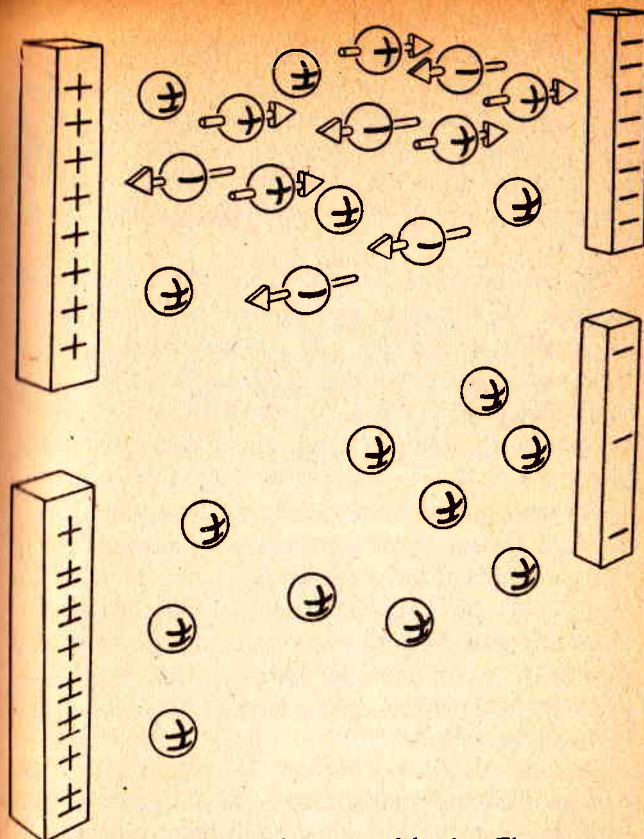


FIG. 4. *Recolección de iones del aire.* El esquema superior representa cinco iones positivos moviéndose hacia el cátodo de la derecha, cinco iones negativos (electrones libres) dirigiéndose hacia el ánodo de la izquierda, y cinco moléculas neutras. (En la realidad habría millones de moléculas neutras por cada par de iones.) En el esquema inferior los cinco electrones libres han penetrado en el ánodo y neutralizado parte de su carga. Los cinco iones positivos han tomado electrones del cátodo y se han convertido en moléculas neutras. El resultado final se presenta como si cinco electrones hubieran atravesado el espacio de aire situado entre los electrodos.

nombre de 'electrones'.) Una molécula que perdía un electrón negativo quedaba con una carga positiva y, si nada nuevo sucedía, estos dos cuerpos cargados (que Thomson llamo 'iones') se volvían a unir por efecto de la atracción eléctrica corriente, y se 're-combinaban' para formar una molécula neutra (sin carga).

Si en las proximidades había placas metálicas cargadas, la atracción que ejercían sobre los iones dispersados dentro del gas era suficientemente intensa como para extraerlos de él. Los iones positivos se dirigían hacia la placa cargada negativamente, donde podían recoger electrones disponibles para remplazar los perdidos. Los iones negativos, que eran electrones libres, se veían por supuesto atraídos hacia la placa cargada positivamente, y se mantenían en ella para neutralizar parte de la carga que la recubría (fig. 4). Si se conectaba un electrómetro a alguna de estas placas, tomaba parte en el cambio ocurrido, y su aguja se desviaba, indicando en qué medida la placa se había descargado (es decir, cuántos iones había recolectado).

La tarea de Rutherford con las placas colectoras y el electrómetro consistía en aprender todo lo que pudiera acerca de los iones producidos por los rayos X: con qué rapidez nacían a la vida, con qué rapidez volvían a combinarse cuando eran dejados solos, y con qué velocidad se movían a través de la masa de gas bajo la atracción de una placa colectora cargada. Este era un trabajo para todo un año y, cuando estuvo terminado, Rutherford cambió el tubo de rayos X por un platillo con óxido de uranio y empleó otro año con los iones producidos por sus rayos. Entre las dos clases de rayos había notables diferencias de comportamiento, que Rutherford exploró en

todo momento, pero los iones que producían eran exactamente iguales.

Durante el verano de 1898, mientras los Curie estaban ocupados con su trabajo sobre el polonio, llegó a Cambridge la noticia de que se ofrecía un cargo en McGill. Rutherford (que estaba ansioso por casarse) se había ofrecido para el puesto, y, con el apoyo entusiasta de Thomson, fue aceptado. Con la mayor rapidez posible concluyó su memoria sobre los rayos del uranio, y en setiembre se embarcó hacia su nuevo destino, donde (como escribiera a su prometida en Nueva Zelandia, la señorita Mary Newton) se contaba con él ¡"para formar una escuela de investigación con el objeto de quitarle la preeminencia a los yanquis"!

Era un reto y una oportunidad, pero un estudiante no se convierte en profesor de la noche a la mañana. Cuatro días después su tono comenzaba a cambiar, y agregaba: "Me resulta bastante cómico tener que supervisar la investigación de otros hombres, pero espero arreglármelas muy bien."

Ahora estaba llevando esto a cabo, y fue aquí donde surgió la investigación de Owens sobre el torio. El plan consistía en que él estudiaría la ionización que producían sus rayos, tal como ya había sido realizado por Rutherford con los rayos X y los del uranio. El único problema real era un cierto comportamiento temperamental que ya Rutherford había notado en la radiactividad del óxido de torio. A veces parecía intensa, a veces débil, y podía cambiar sin previo aviso en medio de una medición. Owens dio pronto con la causa: el óxido de torio era sensible a las corrientes de aire. El único modo de superar esto consistía en encerrar el óxido en un recipiente hermético, esperar un cuarto de hora hasta que se extinguiera la última corriente de aire, y solo en-

tonces comenzar a medir. Si se insuflaba una o dos bocanadas de aire hacia el interior del recipiente, el poder de ionización del óxido de torio caía abruptamente y transcurría otro cuarto de hora hasta que hubiera recobrado su intensidad originaria. Sin embargo, en el aire calmo las mediciones no presentaban inconvenientes, y por el verano Owens había terminado su tarea. Los rayos del torio producían exactamente el mismo tipo de iones que los producidos, de un modo idéntico en grado sumo, por los rayos X y los del uranio.

Luego Owens se embarcó hacia Inglaterra, para visitar el laboratorio de Thomson, y Rutherford emprendió por su cuenta la resolución de un problema que había provocado su curiosidad. ¿Qué hacía una bocanada de aire al quitarle poder de ionización al óxido de torio? Encontró la respuesta antes de entrado el invierno, pero era una respuesta singular, que ponía en danza dos extrañas sustancias con radiactividades temporarias. De hecho era muy singular, pues aunque Rutherford no podía ver estas sustancias, ni tampoco olerlas, tocarlas, o pesarlas, sabía por inferencias que una era un gas y la otra un sólido.

Para resolver su problema, Rutherford decidió buscar 'a favor del viento', investigando no el óxido de torio mismo, sino, por el contrario, el aire que había pasado de largo por el óxido. En uno de los extremos de un largo tubo dispuso un colector de iones, y, en el otro extremo, un envoltorio de papel que contenía óxido de torio. La envoltura de papel impediría que polvo proveniente del óxido pasara al aire e introdujera complicaciones; sin embargo, el experimento debía poder llevarse a cabo ya que Owens había descubierto que el papel no hacía de pantalla contra las perturbaciones del aire (fig. 5).

Como podía haberse esperado, no aparecieron

iones en el colector hasta tanto las corrientes de aire no comenzaron a producirse, y ello no antes de que el aire hubiera tenido tiempo de abrirse paso desde el envoltorio con óxido de torio. Esto era suficientemente claro: significaba que el óxido de torio actuaba sólo sobre el aire presente directamente sobre él. Lo que sucedió luego fue más interesante. Cuando

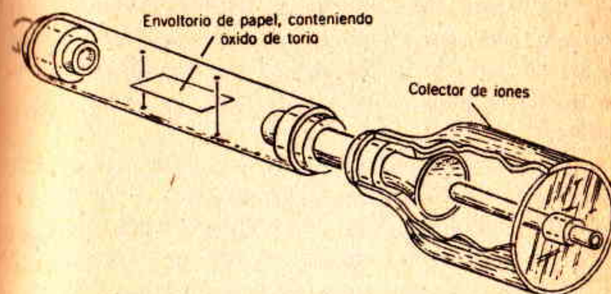


FIG. 5. *El aparato de Rutherford para investigar 'a favor del viento'*. La corriente de aire penetraba por la abertura del extremo izquierdo del tubo, recogía 'emanación' del envoltorio de óxido de torio, y la transportaba al colector de iones. Una batería de 100 voltios cargaba las paredes metálicas del colector, y los iones transportaban la carga a la barra aislada del centro, que estaba conectada a un electrómetro.

Rutherford cortó las corrientes de aire, dejando lleno el colector de iones con aire que había pasado de largo por el envoltorio de papel, transcurrieron alrededor de diez minutos hasta que la ionización se extinguió. Dado que solo se habrían necesitado unos pocos segundos para extraer los iones de un gas, esto significaba que la provisión de iones había sido constantemente renovada en el colector. Entonces, en el colector algo había estado emitiendo rayos ionizantes, y esto parecía significar que una sustancia

radiactiva había sido transportada desde el envoltorio con óxido de torio.

El siguiente problema era de qué sustancia podía tratarse. Podía abrirse paso a través de los poros de la envoltura de papel; podía surgir a través de una gruesa capa de óxido de torio en polvo. No quedaba atrapada en las fibras de un tapón de algodón ni desaparecía cuando se hacía burbujear la corriente de aire a través de agua o de ácido sulfúrico. Parecía más sutil que un polvo, y Rutherford pensó que podía ser un gas o un vapor, pero, para estar seguro, amparándose en la vaguedad, la llamó 'emanación'.

Ante un misterio no hay otra cosa para hacer que investigar. La emanación era radiactiva, y perdía su radiactividad después de un tiempo. Rutherford se abocó a descubrir cómo. Midiendo una y otra vez la ionización en una masa de aire en calma, encontró que la radiactividad decrecía en progresión geométrica con el tiempo, reduciéndose a la mitad con cada minuto que transcurría (fig. 6).

Este es un tipo interesante de comportamiento. Cuando la mitad de lo que se tiene desaparece en un minuto, significa que se perderá mucho cuando se tiene mucho, pero que cuando se tiene poco sólo se podrá perder poco. Al expresar esto matemáticamente, Rutherford concibió un experimento con el cual pudo poner a prueba su apreciación. Supóngase que hubiera puesto un poco de óxido de torio, bien envuelto en papel, en el interior de un colector de iones cerrado. La emanación se habría difundido lentamente a través del papel, y el colector de iones se habría llenado gradualmente con ella. Una vez que la emanación hubiera salido, habría comenzado a perder radiactividad; pero al comienzo, con poca emanación en el colector, la pérdida habría sido pe-

queña. La ganancia en nueva emanación, que continuaría difundiéndose desde el envoltorio, haría más que compensar dicha pérdida. De este modo

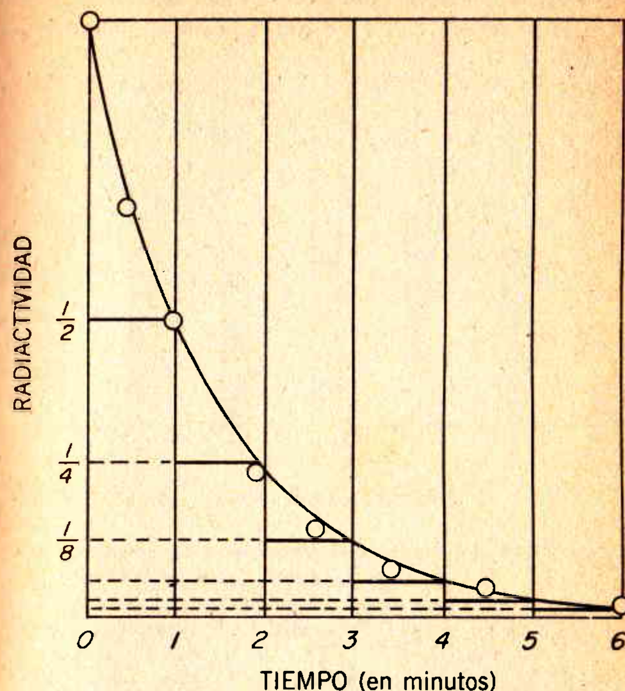


Fig. 6. ***Gráfico de la radiactividad de la 'emanación'.*** **La curva, ideal, muestra cómo la radiactividad de la 'emanación' del óxido de torio decrecía con el transcurso del tiempo. Los circulitos representan las mediciones de Rutherford. La altura de la curva se reduce a la mitad en cada minuto.**

la cantidad de radiactividad crecería. Al hacerlo, sin embargo, la pérdida de la mitad de la actividad con cada minuto transcurrido resultaría una cantidad cada vez mayor (fig. 7).

Recurriendo a la matemática, Rutherford encontró que la radiactividad crecería, hacia un valor final, de un modo muy particular. Si en cualquier instante se hubiera conocido cuánto distaba la radiactividad de ese valor, se habría sabido que un mi-

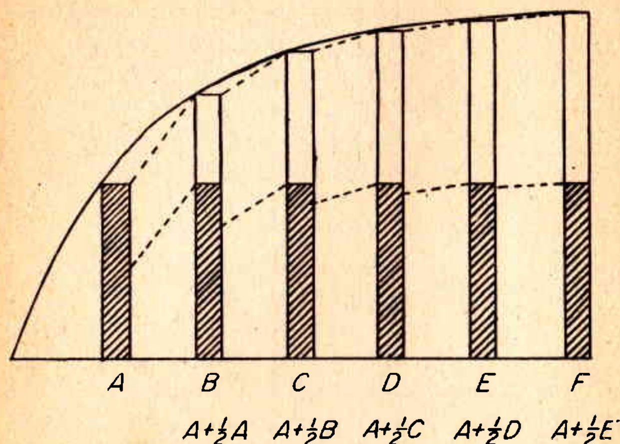


FIG. 7. ***Gráfico de la acumulación de 'emanación'.*** **La columna *A* representa la nueva radiactividad introducida por la 'emanación' desprendida cada minuto del óxido de torio. La radiactividad total, representada por las columnas *B, C, D, E,* y *F,* es aquella cantidad más la mitad de la radiactividad presente en el minuto anterior. De este modo, la columna *F* incluye una cantidad *A* de nueva radiactividad más la mitad del total, *E,* de la radiactividad existente un minuto antes.**

nuto después habría sido cubierta la mitad de la distancia, y en otro minuto la mitad de la mitad restante. Una vez que supo como se desarrollaría el experimento, Rutherford lo llevó a cabo y encontró que ése era exactamente el modo en que ello sucedía (fig. 8).

Mucho antes de esto, allá por la época en que había comenzado a familiarizarse con la emanación, Rutherford se había encontrado con una complicación. Su colector de iones evidenciaba una pérdida de electricidad, y el nuevo enchufe aislante, que

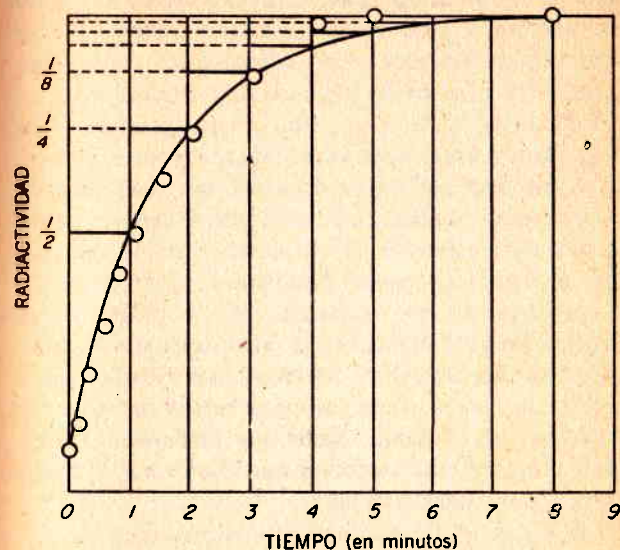


FIG. 8. ***Crecimiento de la radiactividad de la 'emanación' en un espacio cerrado.*** **Los circulitos representan las mediciones reales, realizadas por Rutherford, de la cantidad de radiactividad que se difunde desde un envoltorio con óxio de torio, colocado en un colector de iones cerrado. La curva ideal muestra que, en cada minuto sucesivo, la radiactividad cubre la mitad de la diferencia entre el valor existente y el valor final.**

debía subsanar esto, no fue de ayuda alguna. Este trastorno resultó ser, todavía, considerablemente más extraño: de algún modo las partes metálicas del colector de iones se habían vuelto radiactivas.

Nada semejante había ocurrido con los rayos X o con el uranio; el poder de 'inducir' radiactividad en los cuerpos cercanos parecía corresponder sólo al torio. Como la radiactividad inducida aparecía 'a favor del viento' y alrededor de los recodos, resultaba fácil argumentar que los rayos directos del óxido de torio no la producían, y esto fue confirmado por nuevos experimentos. La radiactividad podía aparecer cuando el óxido de torio se encontraba considerablemente aislado por una gruesa pila de hojas de papel, y esto sugería una ligazón con la emanación. En efecto, el óxido de torio sólo podía inducir radiactividad libremente cuando proporcionaba abundante emanación. Si se llevaba el óxido al rojo blanco perdía su poder de emanar y, en el mismo proceso, perdía su poder de inducir radiactividad.

Otro hecho extraño era el modo en que las fuerzas eléctricas actuaban sobre la radiactividad inducida. Las cargas negativas parecían atraerla, y ello en forma muy intensa, tanto que podía ser concentrada íntegramente sobre un minúsculo aro de alambre cargado negativamente.

Esto sugirió un experimento interesante. Rutherford construyó una larga caja de madera, a lo largo de la cual una corriente de aire podía transportar un flujo lento de emanación, un flujo tan lento que la emanación perdía una buena porción de su radiactividad en el tiempo que le insumía recorrer la caja hasta el extremo. A lo largo del piso de la caja colocó una placa cargada positivamente para repeler la radiactividad inducida, y a lo largo del techo ubicó cuatro placas separadas, una a continuación de la otra, y todas cargadas negativamente de modo que la radiactividad inducida se concentrase íntegramente sobre ellas. Entonces, lo que habría de aparecer sobre cada una de las placas sería todo

lo que la emanación hubiera podido inducir al ser arrastrada frente a ese lugar. Lo que halló Rutherford, cuando examinó las placas al final del experimento, fue una buena cantidad de radiactividad en la primera, y una reducción a una cantidad bastante pequeña, en la última. En efecto, la radiactividad inducida que la emanación producía sobre cada placa era casi proporcional a la cantidad de radiactividad que la emanación conservaba al pasar frente a cada placa.

Hizo la prueba de colocar láminas metálicas sobre la parte superior de una placa que presentaba radiactividad inducida, y encontró que los rayos provenientes de la misma eran algo más penetrantes que los que él había observado en el caso del uranio, y Owens en el del torio. Parecían provenir precisamente de la superficie de la placa, puesto que una ligera estregadura con papel de lija los debilitaba siempre.

Al igual que la radiactividad de la emanación, la nueva radiactividad inducida no era permanente, sino que se extinguía en progresión geométrica con el tiempo. La única diferencia estaba en la velocidad; requería once horas, en lugar de un minuto, para lograr una reducción a la mitad del valor. Cuando Rutherford expuso una placa cargada negativamente a la emanación proveniente de un platillo de óxido de torio, y la retiró una que otra vez para examinarla, la radiactividad inducida sobre la placa creció hacia un valor alto y fijo, recorriendo en once horas la mitad de la distancia hasta ese valor (fig. 9).

Aunque la llamó 'radiactividad inducida', Rutherford no estaba del todo seguro de que era realmente inducida por la emanación. Había muchos hechos que sugerían que los rayos tenían su origen en alguna

sustancia que la emanación depositaba sobre las superficies que tocaba, pero no había nunca nada que pudiese ser observado con un microscopio, ni cambio alguno en el peso que se pudiera detectar con una balanza sensible.

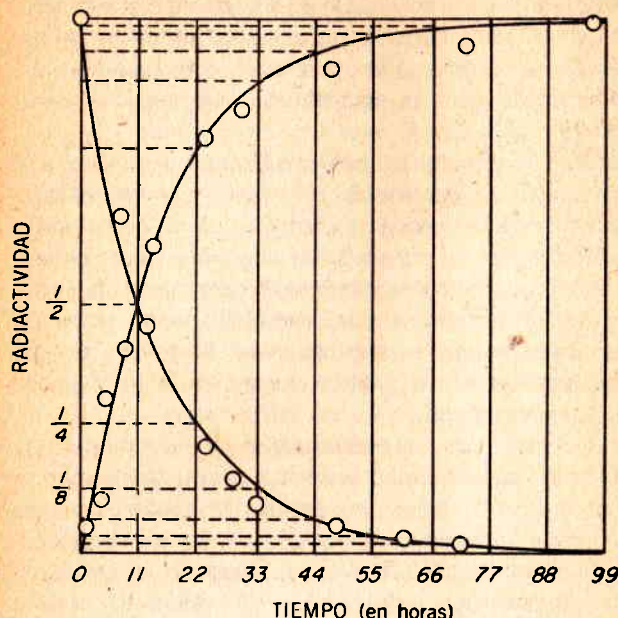


FIG. 9. *Crecimiento y disminución de la radiactividad inducida.* En el caso de la curva ascendente o de crecimiento, el tiempo es la exposición total de la barra colectora de Rutherford a la 'emanación' del óxido de torio. En el caso de la curva descendente o de disminución, es el tiempo transcurrido desde que la barra fue sustraída a la 'emanación'. Los circulitos representan mediciones reales; las curvas son ideales.

En un experimento, Rutherford 'indujo' una considerable cantidad de sustancias diferentes: cobre, plomo, platino, aluminio, estaño, bronce, cartón, y

papel. Si todas estas diferentes cosas habían sido verdaderamente inducidas, si de algún modo habían incorporado energía proveniente de la emanación, era dable esperar que la reintegraran de modos diferentes y característicos. Pero, sin embargo, todas ellas emitían rayos con exactamente el mismo poder de penetración. Una sustancia única, depositada por la emanación, haría precisamente esto.

Si había algún depósito sobre las placas, entonces debería ser posible sacarlo. Rutherford encontró que una ráfaga de aire no lo desalojaba (por lo tanto, probablemente no fuera un polvo). No pudo volatilizarlo mediante una llama (por lo tanto, probablemente no fuera un 'rocío' de emanación condensada). No pudo hacerlo desaparecer de un alambre de platino por lavado con agua caliente o fría. No pudo disolverlo en un álcali fuerte, ni con ácido nítrico concentrado. Pero con ácido sulfúrico diluido, o con ácido clorhídrico diluido, el depósito desaparecía en pocos segundos. Después de esto, Rutherford fue muy interesado por el descubrimiento de que la radiactividad perdida reaparecía en el fondo de la cápsula cuando hacía evaporar el ácido, exactamente como la sal y el azúcar quedarían en pos de sus respectivas soluciones.

Por setiembre (era en 1899) Rutherford había terminado con la emanación, y envió por correo una memoria para ser publicada en Inglaterra. Por noviembre había concluido otra sobre la radiactividad inducida. Las dos fueron publicadas en enero y febrero, pero mucho antes de ese momento, casi sobre los talones del logro de Rutherford, había aparecido una memoria de los Curie sobre la radiactividad inducida por la presencia del radio. Por supuesto, ellos no conocían nada del trabajo de Rutherford, y la nueva radiactividad que hallaron era

de vida tan corta, presentando un contraste tan grande con la permanencia de la del radio y el polonio, que no pudieron creer que provenía de una sustancia especial. A ellos les pareció realmente inducida, el resultado de alguna transferencia de energía, quizás debida a los rayos del radio; y los experimentos que realizaron, considerándola de este modo, fueron completamente diferentes de los que Rutherford había llevado a cabo. Posiblemente las dos radiactividades fueran semejantes, y posiblemente no lo fueran; sin embargo, vale la pena hacer notar que los Curie no habían visto nada parecido a una emanación.

Ciertamente, la ciencia de la radiactividad no se simplificaba.

Capítulo 5

Uranio X y torio X

Como el lector debe ya haber notado, la ciencia es una especie de juego libre que cualquiera puede jugar en cualquier momento. Cuando Röntgen descubrió los rayos X, estimuló a Becquerel en el descubrimiento de los rayos del uranio, y a J. J. Thomson en el desarrollo de la teoría de la ionización de los gases. Los descubrimientos de Becquerel sobre el uranio llevaron a los Curie a encontrar el polonio y el radio. El interés de Rutherford por los iones lo condujo gradualmente a dar con la emanación del torio y con esa extraña cosa que ella producía, y que originaba la radiactividad inducida. Lo que permite mantener el juego es la publicación, porque aunque una persona publique para obtener el reconocimiento de un descubrimiento, lo provechoso para el resto del mundo reside en la información que se vuelve disponible, y de la que cualquiera puede recoger alguna idea sobre algo aún más novedoso para investigar.

El lector no deberá extrañarse, entonces, de que nuevos jugadores se decidan a incorporarse, y fue precisamente como jugador nuevo que Sir William

Crookes entró a estudiar la radiactividad a fines de 1899. Crookes era un químico que vivía en Londres, donde desarrollaba una práctica profesional de consulta, y donde dirigía y editaba un semanario de química,... era un personaje pintoresco, con una barba fina y un bigote blanco crecido y retorcido, que lucía largas y primorosas puntas. Era también un hombre de recursos que gustaba de la investigación, y podía permitirse el lujo de realizarla en un laboratorio privado instalado en el fondo de su casa.

Como químico que era, quería hacer la prueba de extraer el radio de la pecblenda; bien sabía cuán tedioso habría de ser el trabajo de concentración. Sabía que tendría que esperar en cada etapa, y evaluar la radiactividad de cada precipitado para estar seguro de que el radio se dirigía siempre a donde él se había propuesto que fuera. Crookes había sido un pionero de la fotografía, y, antes que poner las manos en un instrumento extravagante como el electrómetro, decidió medir la radiactividad con un método que él comprendiera: con placas fotográficas. Sabía qué dificultades le traerían aparejadas. El ennegrecimiento de una placa dependería de factores distintos de la exposición a la que habría estado sometida: la sensibilidad de la emulsión que la revestía, por una parte, el poder de la solución de revelado, por otra; y ninguno de ellos estaría completamente bajo control. De todos modos, estos factores podrían ser superados si, al lado de cada una de las placas empleadas en la serie de determinaciones de Crookes, se colocara un 'patrón de exposición' tomado de algún material cuya radiactividad pudiera garantizarse.

El uranio parecía apropiado para ser elegido como 'material patrón', pero Crookes pensó que era más seguro usar uranio puro, y él era sobradamente

químico para saber que no podría adquirírselo con la pureza requerida. Se proveyó, entonces, de algunas libras de nitrato de uranilo de calidad bastante ordinaria, y se dio a purificarlo él mismo. Puso un par de puñados de la sustancia dentro de un embudo separador (un bulbo de vidrio con una abertura taponada, arriba, y un grifo, abajo), vertió en su interior un poco de éter, y agitó la mezcla. El nitrato de uranilo comenzó a disolverse en el éter y, al hacerlo, su agua de cristalización quedó en libertad. Como el agua y el éter no se mezclan, el agua se separó en pequeñas gotas, que, al proseguir la agitación, arrastraban algo del nitrato de uranilo y la mayor parte de las impurezas. Cuando las cosas habían adelantado suficientemente, Crookes cesó la agitación, dejó que el agua, más pesada, se asentara en el fondo, la extrajo por medio del grifo, y luego la tiró. Procedió a evaporar el éter para recuperar el nitrato de uranilo purificado, y ya estaba listo para el próximo paso.

Éste consistía en una cristalización fraccionada. Crookes disolvió su nitrato de uranilo mejorado en la menor cantidad posible de agua caliente, y dejó que la solución se enfriara lentamente. Al irse enfriando, comenzaron a formarse nuevos cristales de nitrato de uranilo aún más puro, dejando, una vez más, las impurezas en el agua, junto con la cual podían ser extraídas al concluir el enfriamiento. Después de repetir dos o tres veces este proceso, Crookes estaba satisfecho; su nitrato de uranilo podía ahora considerarse puro. Finalmente estaba listo para emprender el trabajo de envergadura, pero cuando puso a prueba el patrón de uranio puro, las placas quedaron totalmente sin impresionar. El tratamiento químico debía haber afectado el uranio, o haber actuado para eliminar su radiactividad.

Unas pocas y tenaces comprobaciones lo convencieron de que el uranio no era fácilmente afectado. Ensayó el lavado con éter en una partida fresca de nitrato de uranilo, y encontró la radiactividad en donde ahora la esperaba: en el agua de desecho. Por supuesto, también había nitrato de uranilo en esa agua, de modo que el problema siguiente consistía en encontrar un tratamiento químico para extraer la sustancia radiactiva, libre de cualquier mezcla de uranio.

Una vez que Crookes lo hubo encontrado resultó un tratamiento simple. Disolvió en agua un poco de nitrato de uranilo, y mezcló grandes dosis de solución de carbonato de amonio. Al comienzo el uranio precipitó, pero, al proseguir, el precipitado se disolvió, dejando solo un ínfimo residuo que pudo obtenerse por filtración. Sobre el papel de filtro presentaba un aspecto esponjoso y pardusco, y Crookes lo identificó como hidróxido de aluminio coloreado con un poco de hierro. No contenía uranio, pero producía, en el tan breve lapso de cinco minutos, un hermoso ennegrecimiento sobre una placa fotográfica.

Ahora ya no podía haber duda alguna. En ese residuo menor, junto al aluminio y hierro corrientes, se encontraba la 'impureza' a la cual se debía, en realidad, la radiactividad del uranio. A juzgar por su comportamiento químico no podía ser polonio, y tampoco parecía ser radio. Era muy verosímilmente nuevo y provocativamente extraño, y Crookes expresó todos sus sentimientos de admiración y perplejidad dándole el nombre de uranio X.

Fue en mayo de 1900 cuando concluyó e informó de todas estas cosas a la *Royal Society* de Londres. En julio su descubrimiento fue confirmado en una comunicación que Becquerel leyó ante la *Académie*,

en París. Se había servido de un método de purificación de André Debierne, un ex estudiante que ahora estaba realizando trabajos de química para los Curie, y ese método no era, de lejos, tan efectivo como los que Crookes había usado. Becquerel nunca obtuvo uranio totalmente inactivo, pero, en cambio, con perseverancia logró eliminar las cinco sextas partes de la radiactividad de una muestra harto tratada.

Ese fue el verano que Rutherford pasó en Nueva Zelandia, a donde finalmente había regresado, después de casi cinco años de ausencia, para casarse, completando de este modo un viaje alrededor del mundo. Fue también el verano en que el joven Frederick Soddy apareció por Montreal buscando trabajo. Todavía no tenía veintitrés años y era originario de la costa sudoriental de Inglaterra; se había graduado de químico en Oxford algo más de un año antes. El empleo para el cual había llegado al Canadá no se concretó, pero, durante su estadía en Montreal, Soddy fue tan poderosamente impresionado por los magníficos laboratorios que, para la Universidad de McGill, había construido Sir William Macdonald, el millonario del tabaco, que se sintió feliz de ser admitido como instructor de laboratorio en química. De un modo igualmente casual ingresó en una carrera, puesto que al poco tiempo lo encontró Rutherford, y lo alistó para el trabajo con el torio.

Rutherford tenía también radio para trabajar, puesto que una firma alemana de productos químicos lo había colocado en el mercado en preparaciones bastante débiles, y el radio presentaba interés ya que, por aquel entonces, era un hecho conocido que tenía una emanación como el torio. Esto había sido descubierto por el profesor Ernst

Dorn, de la Universidad de Halle (Alemania), y estimuló la curiosidad de Rutherford —cuando éste regresó, en otoño— por saber a qué se parecía la nueva emanación. Prontamente encontró que podía aumentar el flujo de emanación calentando los respectivos materiales, y, si los calentaba intensamente, podía obtener una enorme oleada de emanación, después de la cual, especialmente en el caso del óxido de torio, era difícil obtener mucha más. Esto parecía significar que cada preparación sólida tenía alrededor de la misma cantidad de emanación encerrada en su interior, y que, una vez extraída, se había ido para siempre. Como Rutherford también descubriera, cuando calentaba en forma moderada sus muestras de óxido de torio y de radio, ambas emitían continuamente emanación, durante horas, y en cantidad mucho mayor, en conjunto, que toda la que hacía surgir el calentamiento intenso. Parecía como si se hubiera estado produciendo nueva emanación, y esto sugería que pudiera tratarse de algo parecido a una reacción química.

Cuando el año 1900 dejó paso al 1901, Rutherford y Soddy aunaron fuerzas. (Rutherford podía plantear problemas con mayor rapidez que encontrar recursos para resolverlos. Con respecto a la emanación, en particular, había una cantidad de cosas que un químico podía desentrañar.) Soddy se interesó fácilmente, y entre ambos redactaron un conjunto de cinco problemas para que él investigara:

¿Provenía la emanación, en realidad, del torio, o había alguna otra sustancia oculta que la ponía en libertad?

¿Quedaba el óxido de torio permanentemente afectado cuando se lo calentaba tan intensamente que perdía su poder de emitir emanación? ¿O había algún tratamiento químico que pudiera restaurarlo?

¿Qué clase de gas era la emanación?

¿Podría una pesada muy cuidadosa, realizada con una balanza sensible, poner en evidencia que una preparación que emitía emanación estaba perdiendo peso? ¿O que un cuerpo ganaba peso cuando recogía la radiactividad inducida?

¿Qué particularidad química del torio hacía posible la producción de emanación?

Algunos de éstos eran problemas muy sencillos y otros extremadamente difíciles. El cuarto, por ejemplo, podría solucionarse mediante simple aritmética. Un electrómetro corriente puede detectar 3×10^{-13} culombios de electricidad. (Esta no es una cantidad muy grande. Treinta billones de estas cargas constituirían un único culombio, y esto no es más electricidad que la que circularía en dos segundos por una bombilla de luz de 60 vatios, o en un décimo de segundo por un tostador eléctrico.) En la electrólisis del agua, 10^5 culombios tienen que atravesar una cuba para dejar en libertad un solo gramo de hidrógeno (de modo que la electrólisis sólo puede ser un proceso económico si la energía eléctrica es más barata que de ordinario). Por lo tanto, el electrómetro podría detectar una cantidad de electricidad como la necesaria para transportar sólo 3×10^{-18} gramos de hidrógeno. Estaba enteramente claro que el número de iones recolectados en una medición corriente correspondía a una cantidad increíblemente pequeña de materia, y que los materiales radiactivos, cuyos rayos producían los iones, debían existir en una proporción extremadamente reducida, millones y millones de veces por debajo del alcance de la balanza.

En cuanto a los otros problemas, en el informe final de Rutherford y Soddy se dejan entrever dificultades y extraños sucesos, pero lo que Soddy lo-

gró llevar a cabo ascendió a esto: Ensayó una cantidad de métodos probados para separar el torio de una mezcla de otros elementos, y encontró que el torio purificado siempre emitía emanación. Esto parecía responder al primer problema. Probó toda una serie de reacciones químicas cuidadosamente planeadas, para capturar la emanación arrastrada por un flujo gaseoso y encerrarla en un compuesto sólido. Todas fallaron, aunque entre todas ellas Soddy hubiera estado en condiciones de atrapar cada uno de los gases conocidos. Esto hacía que la emanación fuera posiblemente un miembro de la familia del argón, la de los gases inertes, que el profesor William Ramsay del *University College*, Londres, había venido descubriendo durante los últimos siete años. Esto acababa con el tercer problema. Para el segundo, Soddy encontró un arduo pero práctico procedimiento rutinario con el cual podía llevar el óxido de torio calcinado a una solución en agua, y luego recuperarlo en forma de un compuesto que era emisor espontáneo.

Aquí las dificultades surgieron nuevamente. No era del todo posible volver a su condición original el óxido de torio alterado, pero cuando Soddy lo convirtió en hidróxido de torio, logró incluso superarlo. El hidróxido de torio recién precipitado de la solución emitía tanta emanación como los mejores óxidos comerciales, y mejoró su rendimiento con el correr del tiempo, hasta que después de nueve días la producción de emanación había llegado a ser dos veces y media mayor. Esto era interesante, y también lo fue otro experimento en el que Soddy repartió el torio de una solución de nitrato de torio entre dos precipitados, uno de hidróxido de torio, y el otro de carbonato de torio. A igualdad de peso el hidróxido producía doce veces más emanación

que el óxido corriente; el carbonato no producía prácticamente emanación.

Esto no sólo era interesante sino que también llevaba a confusión, puesto que había sucedido debido a un error inconsciente; pero la racha de trabajo que trajo aparejada condujo rápidamente a Soddy a otro curioso descubrimiento. El modo en que obtenía hidróxido de torio consistía en disolver nitrato de torio en agua, y agregar amoníaco para hacer depositar el hidróxido en forma de precipitado. Esta vez, cuando hubo obtenido el hidróxido por filtración, conservó el líquido filtrado, lo evaporó, y encontró un residuo muy escaso, que no contenía torio y emitía gran cantidad de emanación. Desgraciadamente, lo mismo hacía el hidróxido que acababa de obtener por filtración.

En ese punto, pareció mejor abandonar la emanación y volver a las mediciones directas de la radiactividad, en lo que Rutherford se sentía más a sus anchas. Finalmente obtuvieron una respuesta que no era complicada. Soddy realizó nuevamente las mismas operaciones, y ahora se manifestaba una intensa radiactividad en el residuo, libre de torio, que quedaba en la solución, en tanto que la radiactividad del hidróxido precipitado resultó ser muy reducida.

En medio de su trabajo, uno de ellos halló la memoria de Crookes en los *Proceedings of the Royal Society*, y resultó claro que lo que habían encontrado era un torio X. Se trataba de una 'impureza', pero probablemente, después de haber hecho el cálculo de cantidades, no de una impureza corriente. El nitrato de torio que habían usado no era puro, con toda seguridad. Crookes había mencionado un nitrato de torio altamente refinado que podía adquirirse en Alemania, y parecía más fácil comprar un

poco de este material para los próximos experimentos que tratar de purificar el que poseían.

De todos modos, se acercaba la Navidad, y esto pareció una buena ocasión para interrumpir el trabajo. Habían prácticamente concluido una memoria en la que se describían las investigaciones sistemáticas de Soddy. A ésta le agregaron, como sorpresivo final, su último descubrimiento, y la enviaron por correo a Londres, junto con una carta dirigida a Crookes en la que se pedían informes sobre el nitrato de torio alemán. Luego cerraron el laboratorio con motivo de las fiestas.

(Más o menos una semana antes, el primer Premio Nobel de Física le había sido acordado a Röntgen por su descubrimiento de los rayos X.)

Capítulo 6

El torio X y las transmutaciones

Allá en París, durante los mismos últimos meses de 1901, Henri Becquerel se había encontrado con dificultades. No había duda alguna de que la radiactividad del uranio podía sustraerse mediante procesos químicos inobjetables, pero tampoco había duda de que el uranio era siempre radiactivo. Todos los que habían trabajado con uranio lo habían encontrado así, independientemente de su procedencia, de cómo había sido extraído del mineral, o de qué compuestos particulares habían sido estudiados. En todas estas variadas circunstancias era extraño que nadie hubiera dado siquiera con una muestra pura que fuera inactiva.

Había un camino lógico para salir de la contradicción. Era fácil eliminar la radiactividad del uranio, pero, al concluir, el uranio era siempre radiactivo. Por lo tanto, el uranio purificado debía poseer el poder de reactivarse a sí mismo. Esto era lógico, de no ser plausible, y podía ser verificado experimentalmente puesto que Becquerel había conservado cuidadosamente, desde el verano de 1900, todas sus antiguas preparaciones, cada muestra de

tes. El torio X perdía su radiactividad en proporción geométrica con el tiempo, reduciéndola a la mitad cada cuatro días. El hidróxido de torio comenzaba con una radiactividad pequeña, que crecía hasta un valor constante, alrededor de cuatro veces su-

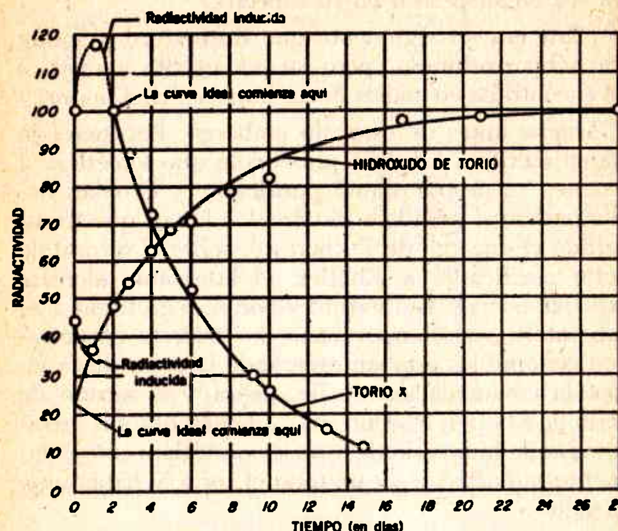


FIG. 10. *Experimento con el óxido de torio.* La curva descendente representa la disminución de la radiactividad en el torio X, que Rutherford y Soddy extrajeron del hidróxido de torio. La curva ascendente representa el crecimiento de la radiactividad en el hidróxido de torio, debida a la transmutación del torio en torio X. Como en los diagramas anteriores, los circulitos indican mediciones reales; las curvas son ideales.

perior, adquiriendo la mitad de lo que le faltaba para ese valor en el mismo período de cuatro días (fig. 10).

Si las curvas eran análogas a las anteriores (fig. 9), entonces la explicación sería la misma. En el interior del hidróxido de torio se producía constantemente torio X, y, una vez producido, perdía su radiactividad de acuerdo con la típica proporción geométrica, y con su propia velocidad característica. Al comienzo, cuando la cantidad de torio X era pequeña, la mitad de éste que dejaba de ser radiactiva era una cantidad mucho menor que la producida por el hidróxido de torio; la radiactividad del torio se estabilizaría sólo cuando la pérdida de radiactividad hubiera igualado la producción de nuevo material.

El problema estaba en imaginar de dónde provenía el torio X. Podía no provenir de parte alguna, o podía provenir del torio. Ambas suposiciones eran absurdas, pero la primera era, además, increíble. Si el torio X era una sustancia, si estaba constituido por materia, entonces el torio era la única materia de la cual podría presumiblemente provenir. Como ambos eran químicamente diferentes, debían estar constituidos por distintos tipos de átomos. En una palabra, el torio era un elemento, el torio X, otro, y los átomos de torio debían estarse transmutando constantemente en átomos de torio X.

No había otra conclusión posible. Rutherford y Soddy tuvieron primero que convencerse a sí mismos, frente al escepticismo de los Curie (temerariamente puesto en letras de molde), y luego al resto del mundo.

Rutherford y Soddy decían que el renacimiento de la radiactividad del hidróxido de torio significaba que en él se producía nuevamente torio X, que en tal caso habría de ser tan fácil de separar como lo había sido la cantidad originaria. Tomaron un hidróxido viejo al cual ya le había sido extraído una vez el torio X, lo disolvieron en ácido nítrico, y le agregaron amoníaco para precipitar nuevamente el torio.

En el líquido filtrado encontraron la cantidad acostumbrada de torio X. Veinticuatro horas después disolvieron nuevamente el hidróxido e hicieron depositar una vez más el torio. Esta vez el líquido filtrado contenía una sexta parte de la cantidad acostumbrada de torio X, prácticamente la que debería haberse producido en las veinticuatro horas de espera. Seis horas después volvieron a hacer la prueba, y esta vez el torio X acumulado se había reducido a una 13 ava parte, nuevamente de acuerdo con las previsiones.

El torio X continuaba, efectivamente, siendo producido, pero esto no hacía necesario que fuera un producto atómico. Podría posiblemente resultar de una transformación química corriente, y, en tal caso, la velocidad con la cual nacía a la vida podría ser afectada por condiciones externas. Reacciones químicas que tienen lugar rápidamente dentro de una solución pueden no producirse en mezclas sólidas; el calentamiento generalmente las aceleraría, y el enfriamiento las atemperaría. No era éste el modo en que se comportaba el torio X, como Rutherford y Soddy pudieron comprobar en toda una serie de experiencias. Continuaba produciéndose, como lo mostraba su radiactividad creciente, y exactamente con la misma velocidad, ya sea que el hidróxido de torio estuviese húmedo o seco, caliente o frío, en estado sólido o en solución.

Por lo tanto, si el torio se transmutaba en torio X, éste podría muy bien estarse transmutando en emanación. De todos modos, era cierto que el torio X emitía emanación en proporción directa a su propia radiactividad.

La transmutación proporcionaba la explicación más simple para todo lo que Rutherford y Soddy habían visto, pero ciertamente era una noción radical, y por ello pusieron el mayor cuidado al redactar la

comunicación en la cual pensaban exponer esto. En particular, pusieron mucho empeño en un argumento basado en la energía. La nueva teoría, decían, concordaba muy ajustadamente con las nociones corrientes acerca de la energía. Cuando la radiactividad parecía perpetua había sido necesario imaginar algún modo por el cual se reintegrara al radio, al uranio o al torio la energía que escapaba constantemente en forma de rayos. Ahora, en cambio, se podría suponer que un átomo de torio contenía un cierto acopio de energía almacenada. Cuando se transmutaba en un átomo de torio X, una parte de dicha energía quedaba disponible para ser liberada. Iría surgiendo lentamente, y los rayos que la transportaban disminuirían en forma gradual al reducirse más y más la energía disponible en el átomo. Luego una nueva transmutación liberaría una nueva porción de energía para ser empleada por la emanación, y, de un modo completamente análogo, la transmutación de la emanación pondría en libertad otra porción para proveer la radiactividad inducida. De este modo se podría explicar la radiactividad 'permanente' como un proceso muy lento de eliminación. El número de átomos de radio y de torio que se transmutarían sería tan pequeño que no produciría ningún cambio perceptible en el número de los que quedaron.

Con todo había aún unas pocas dudas que esclarecer, y la peor de ellas era la persistencia de la radiactividad del torio. Crookes había liberado al uranio del uranio X, y con éste se había ido toda la radiactividad. Soddy estaba en condiciones de extraer del torio el torio X, y aparentemente todo el torio X, pero el hidróxido precipitado conservaba siempre alrededor de un tercio a un cuarto de su actividad original. Con todo, pensaron, este y otros detalles se esclarecerían con el tiempo.

Luego, después de haber tratado de la energía y de haber insinuado su salida para los enigmas sin resolver, estaban listos para hacer accionar la trampa de su lógica. Primero (dijeron), la radiactividad es cosa de átomos —y ésta era la opinión, firmemente establecida, de los Curie—; segundo (prosiguieron), era "la manifestación de un *tipo especial de materia* en cantidades diminutas". (Esta idea era una contribución particular de Rutherford.) Por lo tanto (y la trampa se cerró), la radiactividad tenía que ser la "manifestación de alguna transformación química subatómica".

Con esto habían puesto lo mejor de su parte. Cerraron la comunicación con unos pocos párrafos más de persuasión, y la enviaron por correo a la *Chemical Society* de Londres. Para mayor seguridad, Rutherford le escribió a Crookes —ya que había sido tan servicial en la cuestión del nitrato de torio—, pidiéndole su ayuda para hacer que la comunicación transpusiera el escritorio del editor.

Capítulo 7

Rayos y transmutaciones

La nueva teoría era plausible y promisoria, pero, para ser rigurosamente honestos, Rutherford y Soddy la habían sometido a sólo una verificación completa: la de la transmutación del torio en torio X. La producción de uranio X seguiría probablemente las mismas reglas, y Soddy se abocó a repetir los experimentos de Crookes sólo para fracasar completamente. El uranio permanecía inalterado, y no había signo alguno de uranio X. (Era extraño con qué regularidad fracasaba cada experimento que tuviera que ver con el uranio.)

Esto era imposible. Crookes era un químico de primera categoría y Soddy, por lo menos, razonablemente competente, pero no vio la causa del trastorno hasta que su desesperación lo condujo a una copia exacta del procedimiento de Crookes. Éste había usado una placa fotográfica para detectar la radiactividad, y sobre una de ellas pudo demostrar también Soddy que el uranio no emitía rayos en tanto que el uranio X los acaparaba todos. Pero al medir la ionización, como lo había aprendido de

Rutherford, encontró rayos sólo en el uranio, y nada en el uranio X.

De regreso de Cambridge, donde había estado estudiando la ionización producida por los rayos de Becquerel, Rutherford notó que los del uranio eran una mezcla de dos tipos diferentes, y los rotuló con los nombres, completamente convencionales, de rayos alfa y beta. Los rayos alfa producían una ionización enorme, pero tenían un poder de penetración tan pequeño que eran detenidos por una simple hoja de papel. Los rayos beta poseían una penetración análoga a la de los rayos X y, como contraste, producían una ionización bastante débil. La envoltura de papel, que había protegido las placas de Crookes de la luz natural, había detenido los rayos alfa pero había dejado pasar los beta, mientras que el colector de iones de Soddy había respondido a los rayos alfa pero no había dado indicación sobre los beta. Parecía como si el uranio emitiera rayos alfa, y el uranio X sólo rayos beta.

Por aquel entonces, Thomson había mostrado que los rayos catódicos eran haces de electrones de alta velocidad, y Becquerel había descubierto, un poco después, que los penetrantes rayos del radio y del uranio eran electrones del mismo tipo. Los electrones de los rayos catódicos generaban rayos X al chocar contra la pared de vidrio del tubo que los producía, y se admitía generalmente que, cuando los electrones de los rayos beta eran detenidos por efecto de colisiones en el interior de los montones de polvo radiactivo del cual provenían, también generaban rayos X. Era muy plausible que estos rayos X constituyeran la radiación blanda e ionizante a la que Rutherford había dado el nombre de alfa.

En ese mismo momento, en McGill, un joven instructor de física llamado A. G. Grier estaba concluyendo una investigación sobre las relaciones entre los rayos alfa y beta de las diferentes sustancias radiactivas. (Grier era específicamente ingeniero electricista, pero Rutherford se lo había anexado con la misma facilidad con que había incorporado a Soddy.) Había desarrollado una cámara de ionización especial, sólo para rayos beta, y con ella confirmó lo que Soddy ya había supuesto: que el uranio no emitía más que rayos alfa, y el uranio X nada más que beta. Entonces, con Soddy encargándose de la parte química, Grier abordó los productos del torio y encontró que aunque el torio X emitía rayos de ambos tipos, el torio era semejante al uranio y emitía solo rayos alfa. La mayor parte del trabajo realizado por Grier en invierno había sido hecha a un lado, ahora, puesto que si cada tipo de rayo podía presentarse sin el otro, no había evidentemente ninguna relación entre ellos. Pero el nuevo descubrimiento era suficientemente fascinante como para servir de compensación.

Soddy era químico. Con vistas a la reputación que aún tenía que hacerse, las dos extensas comunicaciones sobre la emanación y sobre la producción de torio X habían ido a parar a una publicación de química. Esto significaba que ningún físico las vería jamás, y así, cuando la primavera de 1902 se volcó en el verano, las comunicaciones fueron remodeladas para la principal publicación de física de Inglaterra, que llevaba un nombre anticuado, *The Philosophical Magazine*. Comenzaron con la segunda comunicación, que era mucho más importante, y fue posiblemente seis semanas después cuando se dieron a la tarea de poner en forma las partes interesantes de la primera.

Era una temporada que incitaba a la indolencia, en que las clases habían concluido, en que la mayoría de los viejos experimentos habían sido desentrañados

y no habían sido comenzados otros nuevos. Rutherford y Soddy habían estado atareados y ahora estaban descansando. Es en oportunidades como ésta que las ideas comienzan a sufrir cambios, que las viejas nociones adquieren una nueva apariencia, y que conjuntos de informaciones que parecían completamente independientes se presentan íntimamente relacionados. Algo por el estilo les sucedió a Rutherford y Soddy. Una vez que hubieron concluido de describir sus primeros experimentos sobre la emanación, cambiaron abruptamente de tema y cerraron la comunicación con una nueva versión de su teoría de la transmutación. No parecía un cambio muy grande, pero era sorprendente cuánto más poder le daba a la teoría.

Antes habían imaginado el proceso de transmutación del modo siguiente: Había una alteración en el interior del átomo, algún cambio en el modo en que estaba constituido, que producía también un cambio en su comportamiento químico. Este cambio traía a la superficie, por así decirlo, una cierta cantidad de energía que el átomo transmutado procedía a eliminar emitiendo un largo haz de rayos de lenta atenuación. Ahora, en cambio, sugerían que la energía aparecía en una sola oleada de rayos, en el mismo instante en que el átomo se transmutaba. La emisión de rayos se convirtió en una parte íntima del acto de la transmutación.

Cuando pensaban que los rayos eran un signo de la presencia de átomos ya transmutados, se encontraron embrollados para explicar cómo era que el uranio y el torio inalterados podían emitir rayos alfa. Ahora los rayos resultaron necesarios como el signo exterior de sus actos de transmutación. Cada rayo alfa del torio decía de un átomo que se había transformado

en torio X; cada rayo del torio X informaba de la aparición de un átomo de emanación. Los rayos de ésta señalaban su transformación en la sustancia depositada correspondiente a la radiactividad inducida, y a su vez los rayos de ésta indicaban aún nuevos cambios en el interior del depósito sólido.

Se deducía, por lo tanto, que la intensidad de los rayos daba el número de transmutaciones que se producían en realidad. Entonces era acertado esperar, como ya lo habían mostrado los experimentos de Rutherford y Soddy, que cuando la radiactividad del torio X fuera elevada habría una rápida producción de emanación, y que cuando la emanación fuera activa aparecerían grandes cantidades de radiactividad inducida.

Finalmente, la nueva teoría le asignaba un perfecto sentido a la progresión geométrica en la disminución de la radiactividad. No había modo de variar la velocidad de esta disminución por cambio alguno en las circunstancias exteriores, y esto se hacía aún más evidente en los experimentos de Pierre Curie que en los que habían realizado Rutherford y Soddy. Esto significaba que no podría haber cooperación entre un átomo y otro para hacer nacer los rayos. Si la hubiera habido, el calentamiento de los átomos, para llevarlos a un contacto más frecuente, debería haber alterado su radiactividad, y lo mismo habría resultado de encerrarlos en cristales para mantenerlos apartados. Como la emisión de rayos era un acto que cada átomo llevaba a cabo separadamente, y como este acto era también el de la transmutación, entonces un pequeño cálculo bastaba para mostrar que las transmutaciones y la emisión debían realizarse según la progresión geométrica.

Una teoría es útil cuando permite explicar cosas ya conocidas, pero también lo es cuando sugiere nue-

vas cosas para ser buscadas en el futuro. La nueva teoría de la transmutación servía a ambos fines, puesto que sugería un experimento no intentado aún, y que Rutherford encontró irresistible: descubrir qué eran en realidad los rayos alfa. Mientras parecían ser un efecto secundario de los rayos beta había sido de escaso interés el investigarlos, pero Rutherford sabía ahora que no eran un efecto secundario y que desempeñaban un papel en las propias transmutaciones iniciales, tanto del uranio como del torio. Aún más, observó que los rayos alfa no necesitaban ser rayos X. En efecto, para transportar en una sola oleada la energía de los átomos que se transmutaban más les valdría ser corpusculares, es decir, algún tipo de partículas subatómicas en movimiento, como los electrones de los rayos beta.

Puesto que la radiactividad inducida era recolectada por placas cargadas negativamente, los átomos que la emitían deberían estar, ellos mismos, cargados positivamente. Estos átomos provenían de átomos de emanación, cada uno de los cuales había perdido un rayo alfa; por lo tanto parecía probable que las partículas de los rayos alfa hubieran sustraído las cargas negativas que faltaban. En tal caso, estas veloces partículas cargadas negativamente podrían ser manejadas por un campo magnético.

Cuando una carga eléctrica es llevada a través de un campo magnético, actúa sobre ella una fuerza transversal, perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético y también a la dirección con que se mueve la carga. Así, una partícula cargada se desviará al atravesar un campo magnético, y la magnitud de la desviación dependerá (de un modo un tanto complicado) de la carga que transporte, de la masa que posea, de la velocidad con que se mueva, y de la intensidad del campo que atraviese (fig. 11).

Algo más de dos años antes, Pierre Curie había experimentado el efecto de un campo magnético sobre los rayos provenientes del radio. Había hallado

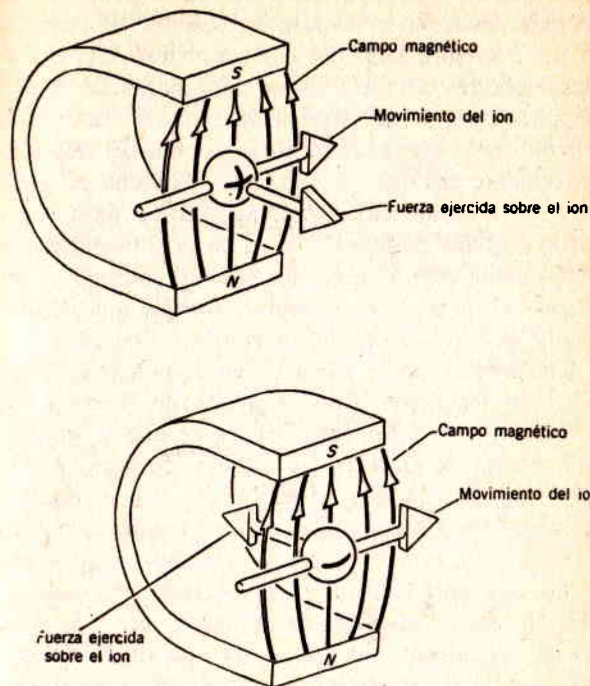


Fig. 11. *Comportamiento de un ion en un campo magnético.* Un ion que se mueve a través de un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a las líneas de fuerza del campo y a la dirección de movimiento del ion. El sentido de la fuerza depende de si la carga eléctrica del ion es positiva o negativa.

que los rayos beta se curvaban marcadamente cuando se desviaban los electrones que los componían, y que los rayos alfa avanzaban en línea recta. Para ser estricto en la interpretación, sus experimentos habían

mostrado tan solo que los rayos alfa no se desviaban mucho. Rutherford realizó la investigación con más rigor.

Colocó un poco de radio en un extremo de un corredor estrecho y dispuso su colector de iones en el otro. A cada lado del corredor situó una de las piezas polares del electroimán del laboratorio. Luego lo aplicó para ver si pasaban más rayos con el imán desconectado que cuando no lo estaba. El único inconveniente era que, si hacía muy estrecho el corredor, no pasarían suficientes rayos como para accionar el colector de iones, y si lo hacía suficientemente ancho como para obtener un poco de ionización, entonces habría espacio de sobra para que una partícula alfa se desviara sin chocar contra las paredes.

Una mejora obvia consistía en aumentar la intensidad de los rayos. Con la ayuda de Pierre Curie convenció a un fabricante francés de que le vendiera una mezcla de cloruros de radio y de bario mucho más rica que la que generalmente era enviada al mercado. Otra mejora consistía en lograr corredores que fueran a la vez anchos y estrechos, y para esto se las compuso Rutherford inventando una pequeña caja de metal dividida en 'ranuras' por una serie grande de placas paralelas, que determinaban una gran cantidad de estrechos corredores, uno al lado del otro. Una tercera mejora estribaba en aumentar la sensibilidad de su detector de rayos, lo cual realizó remplazando su colector de iones y su electrómetro usuales por un electroscopio de nuevo modelo, colocado directamente sobre la caja con las 'ranuras'.

(El electroscopio no era más que una angosta lámina de metal sostenida por un taco aislante y con una tira de hoja de oro fijada cerca del extremo superior. Cualquier carga colocada sobre la placa de metal era compartida también por la hojuela, y como

cargas iguales se rechazan entre sí, la muy liviana hoja de oro se separaría formando un ángulo con la placa. Los iones formados por los rayos alfa que surgirían a través de las 'ranuras' de la caja serían atraídos por la hojuela y, al alcanzarla y descargarla, ésta caería gradualmente. Rutherford podía observar esta caída a través de un microscopio de gran campo, mirando a través de una ventana de vidrio de la caja del electroscopio, y podía cronometrar el paso del borde de la hojuela frente a una escala numerada del ocular. Así podía obtener la velocidad de caída, que era, por supuesto, una medida de la intensidad de los rayos (fig. 12).)

Una vez que la cajita estuvo colocada entre las piezas polares del imán y se hubo desparramado radio nuevo sobre su piso, la hoja de oro cayó de un modo muy satisfactorio en tanto el imán estuvo desconectado. Cuando Rutherford lo conectó se hizo evidente que la hojuela caía con más lentitud, y con ello supo que los rayos se curvaban ligeramente. Esto era todo lo que podía realizar con la corriente más intensa que podía animarse a usar con el imán del Departamento de Física, y en este punto Owens vino en su ayuda. Entre ambos desmontaron parcialmente la dínamo más grande del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, sustituyendo sus piezas polares por otras de menor tamaño y más próximas entre sí. Luego ubicaron la caja, hicieron circular la corriente, y la hoja de oro permaneció rígida. Los rayos alfa eran proyectados contra las paredes de los corredores por el campo magnético, y por lo tanto no podían ser otra cosa que partículas cargadas de movimiento rápido. En días como éste, cuando todo iba bien, se podía escuchar a Rutherford cantar triunfalmente, de un lado al otro del edificio, "Adelante, soldados cristianos".

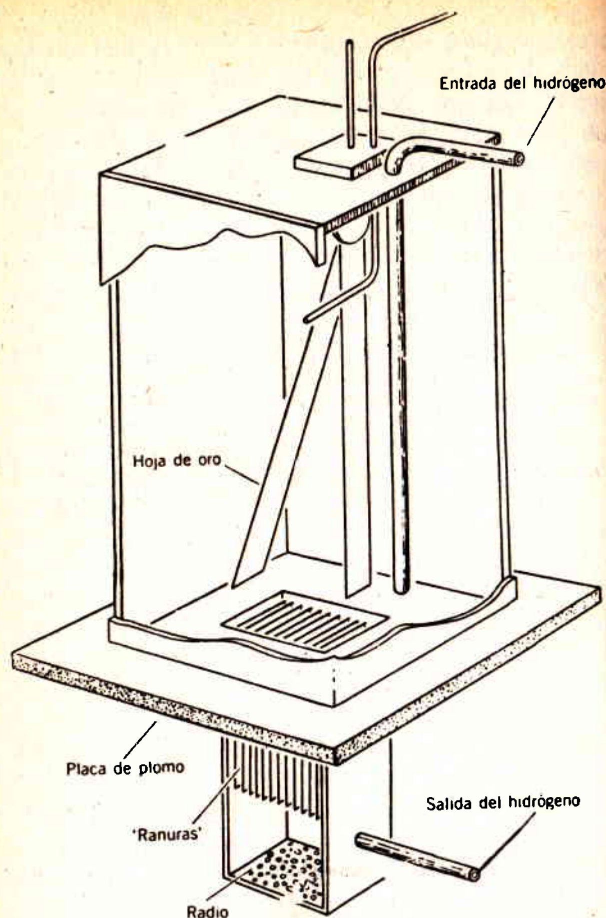


FIG. 12. *El detector de rayos alfa de Rutherford.* El hidrógeno introducido por el tubo de la parte superior se llevaba de regreso la emanación del radio, y la placa de plomo protegía al electroscopio de los penetrantes rayos del radio. El terminal anguloso que sobresale del electroscopio podía ser girado para apartarlo de la placa de metal y prevenir la pérdida de electricidad después de que la hoja de oro y la lámina hu-

El paso siguiente consistía en asegurarse del signo de la carga que dichos rayos poseían, en saber si era positiva o negativa. En un campo magnético determinado, las cargas positivas y las negativas son desviadas en sentidos opuestos, de modo que todo lo que Rutherford necesitaba era encontrar de qué manera se curvaban los rayos alfa. Para ello había construido una caja en la cual cada 'ranura' tenía una pequeña tapa, que cerraba uno de los lados y dejaba el otro abierto. Ahora un campo magnético más débil podría detener la ionización en la cámara en que estaba suspendida la hoja de oro, pero solo si proyectaba las partículas alfa debajo de las tapas. Si se desviaban en el otro sentido, hacia las aberturas, aún podrían pasar y la hoja de oro continuaría cayendo. Rutherford hizo la prueba con la nueva caja y, con intensa sorpresa, encontró que las partículas alfa estaban cargadas positivamente (fig. 13).

(Esto significaba que, cuando el átomo de emanación se transmutaba, perdía carga positiva por medio de su partícula alfa, pero como en el proceso se podría desprender una cantidad de electrones negativos, que se llevarían una carga total mayor, el átomo del nuevo elemento podría resultar, con todo, positivo.)

Las partículas alfa eran asombrosamente difíciles de mover, de modo que, o se desplazaban a velocidades inmensas, o bien eran enormemente pesadas (comparadas con los electrones). No era posible

bieran sido cargadas. La ionización producida por los rayos alfa que pasaban a través de la caja con las 'ranuras', en el piso del electroscopio, descargaba la hoja de oro. Para comprobar el efecto de un campo magnético sobre los rayos alfa, Rutherford dispuso la caja con las 'ranuras' entre los polos de un electroimán.

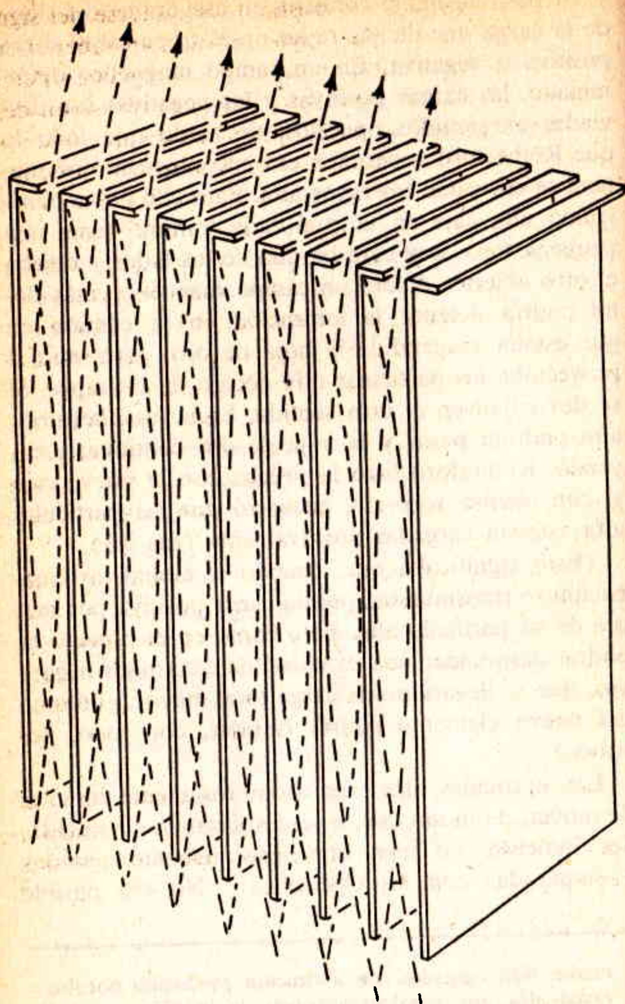


Fig. 13. *Un triunfo de Rutherford.* Con este dispositivo, desarrollado a partir de la caja del extremo inferior del aparato que se puede observar en la figura 12, Rutherford descubrió que las partículas alfa tienen car-

delimitar estas dos influencias sólo con el campo magnético, pero si Rutherford podía también arreglárselas para curvar la trayectoria de las partículas en movimiento por medio de un intenso campo eléctrico entre dos placas cargadas, entonces tendría los medios matemáticos para realizarlo. El nuevo experimento era suficientemente fácil de idear, ya que sólo era necesario construir la caja con ebonita, para aislar las placas divisorias, y luego disponer conexiones, de modo que las placas pudieran ser cargadas positiva o negativamente en forma alternada. El problema era hacer funcionar todo esto, puesto que las partículas alfa producían una ionización muy intensa, y las corrientes de iones que se dirigían a las placas cargadas hacían posible la producción de chispas antes de que el campo eléctrico fuera lo suficientemente intenso como para ser útil.

Finalmente Rutherford tuvo que contentarse con una conjetura. En base al largo y al ancho de las 'ranuras', y a la velocidad con la cual disminuía la caída de la hoja de oro, pudo afirmar algo acerca de la curva que seguían las partículas alfa. Gracias al campo magnético poseía más conocimientos precisos. Agotando la aritmética, encontró que la velocidad de las partículas alfa era de $2{,}5 \times 10^9$ centímetros por segundo, o sea, alrededor de la décima parte de

ga positiva. Un campo magnético las desviaba mientras se desplazaban —a través de los corredores de la caja con las 'ranuras'— desde el radio hacia la hoja de oro del electroscopio. Para hallar en qué sentido se desviaban —y por lo tanto si su carga era positiva o negativa— cubrió los extremos superiores de los corredores, reduciendo el tamaño de la abertura. Si las partículas se volvieran hacia la izquierda, chocarían contra las tapas. Si lo hicieran hacia la derecha, pasarían a través de las aberturas reducidas.

la velocidad de la luz. La razón de carga a masa de cada partícula era de alrededor de 6.000, en las unidades que él había elegido para usar (abculombios por gramo).

Esto decía mucho más de lo que se puede creer, puesto que precisamente la misma razón, de carga transportada a masa de la partícula portadora, se presentó en los experimentos de galvanización por electrólisis. Cuando pasaban 9.650 abculombios de electricidad a través de la solución apropiada, depositaban 108 gramos de plata, 32 gramos de cobre, o un gramo de hidrógeno. Como todos los iones de una solución tienen que ser del mismo tipo, si se dividía la carga eléctrica total transportada por la masa del material depositado, se obtendría la razón de carga a masa para cada ion separadamente. Ésta resulta, si se hacen los cálculos, un poco menos de 90 para la plata, casi exactamente 300 para el cobre, y 9.650, o sea por debajo de 10.000, para el hidrógeno. Como estos números (y los cálculos) lo ponían en claro, se trata de un número que se hace mayor cuanto más liviano sea el ion. Para los electrones (en el otoño de 1902) la razón de carga a masa se estimaba en algo así como 10^7, y este valor tan grande era uno de los elementos de prueba de que los electrones debían ser partículas subatómicas, es decir, tan solo pequeños fragmentos de átomos.

Era fácil ver que las partículas alfa no eran nada semejante a los electrones, pero que tenían que ser por lo menos tan pesadas como los átomos livianos corrientes. Como el valor de 6.000 que Rutherford había dado, para la razón de carga a masa de las partículas alfa, era una mera estimación, no resultaba conveniente forzar el argumento para tratar de decidir si eran átomos de alguno de los elementos conocidos o un cuerpo especial desconocido hasta entonces. Los

hechos desnudos, tal como se presentaban, eran de sobra interesantes.

Estos hechos fueron lo único de lo que Rutherford informó cuando describió sus experimentos. Sin embargo, estaba claro que estas partículas alfa, cargadas positivamente y de dimensiones atómicas, eran exactamente lo que requería la nueva versión de la teoría de la transmutación. Un átomo que emitiera una de ellas debería, sin duda, volverse muy distinto.

Capítulo 8

Transmutaciones y energía

¿Era verdadera la teoría de la transmutación? Esta parece un pregunta bastante razonable para ser hecha aquí, pero sería mejor preguntar (como ya lo hemos sugerido) si era útil. Tenemos una tendencia a sentir un gran apego por las cosas que llamamos verdaderas, a encontrar difícil desecharlas o incluso argumentar tranquilamente sobre ellas cuando son puestas en duda. En ciencia, como lo hemos aprendido a través de duras experiencias, las teorías no siempre perduran, y cuando una teoría ya no es más útil, es mejor abandonarla por una que sí lo sea.

La teoría de la transmutación había respondido muy bien hasta entonces, y durante el invierno de 1902-3 continuó demostrando su valor cuando Rutherford y Soddy intensificaron sus investigaciones.

Ahora que sabían quién era quién entre los rayos, Soddy separó del uranio algo de uranio X, y durante cuatro meses tuvieron en observación los rayos beta de las dos muestras. Exactamente como en el caso del torio X, el uranio X perdía su radiactividad y, del mismo modo que el torio, la radiactividad del uranio parecía restablecerse a medida que el aumento de los

rayos beta señalaba la presencia, en él, de más y más uranio X. La única diferencia estaba en la escala del tiempo; el uranio X necesitaba veintidós días para semicompletar su transformación.

Las emanaciones se aproximaron un poco más a algo con apariencia de realidad (no hay nada más vago que un gas imperceptible) cuando Rutherford y Soddy mostraron que tanto la emanación del radio como la del torio podían ser condensadas en un lugar suficientemente frío. Como precisamente acababan de aparecer en el mercado máquinas para obtener aire líquido, Sir William Macdonald había sido inducido a comprar una para la Universidad de McGill; apenas estuvo en funcionamiento (días antes de ser formalmente habilitada) Rutherford y Soddy se la apropiaron para sus propios fines. El experimento que intentaron consistía en insuflar aire mezclado con emanación a través de un tubo arrollado en forma de tirabuzón, y estudiar el poder ionizador de la mezcla en el extremo más lejano. Como la ionización se detenía cada vez que el serpentín era sumergido en aire líquido, y volvía a comenzar cuando el serpentín se calentaba, era razonable concluir que la emanación se había condensado.

Usando una nueva muestra de radio, Soddy pudo obtener suficiente emanación para estudiar su comportamiento químico. Como se resistía a toda combinación química, debería pertenecer, ella también, a la familia del argón.

La producción de emanación era la única transformación radiactiva sobre la que parecían influir las condiciones externas. El cloruro de radio emitía más emanación cuando era calentado o estaba en solución que en su estado corriente, y el óxido de torio presentaba en parte los mismos efectos. Con todo, esto no significaba necesariamente que la producción de

emanación estuviera alterada. Podría muy bien ser producida con un ritmo perfectamente constante, y lo único que el humedecimiento o el calentamiento podrían hacer variar sería su escape desde el polvo sólido en cuyo interior la emanación se había formado. Éste era un problema que ahora ellos sabían cómo investigar.

El cloruro de radio sólido no emitía emanación. Cuando se lo cristalizaba a partir de una solución y se lo dejaba estar, si la emanación se producía en su interior con un ritmo constante, la cantidad de emanación retenida tendería hacia un límite fijo según el familiar proceso de crecimiento geométrico. Como ya ahora Rutherford y Soddy sabían, la emanación necesitaba cuatro días para perder la mitad de su radiactividad, y por lo tanto alrededor de un mes después el cloruro de radio contendría toda la emanación que le sería posible contener.

No era difícil hallar qué cantidad de emanación era ésta. Tomaron un frasco con un tapón, pusieron agua en su interior, agregaron el cloruro de radio, y a través de la solución insuflaron aire, que pasaba seguidamente a un recipiente para gases, hasta que estuvieron seguros de que toda la emanación aprisionada había sido arrastrada fuera. Entonces cerraron el frasco herméticamente, lo apartaron, y midieron la emanación extraída, por medio de la ionización que producían sus rayos. Una hora y cuarto después volvieron a insuflar aire a través del frasco, y una vez más estudiaron la emanación que el aire arrastraba. Resultó exactamente la cantidad predicha por la teoría de la transmutación, admitiendo que el radio se convertía en emanación a un ritmo constante. La producción de la emanación del radio era (por fin) completamente análoga a cualquier otra transmutación radiactiva.

Así pasó el invierno, y con la primavera llegó para Soddy un ofrecimiento de un puesto en el laboratorio de Ramsay, en Londres. (Dicho sea de paso, el profesor Ramsay se había convertido ahora en Sir William.) Antes de que se disolviera la sociedad, Rutherford y Soddy escribieron una última comunicación en la que resumían todo lo que hasta el momento habían hallado sobre la radiactividad, y la concluyeron con un poco de cálculo atómico.

Si se conocen la masa y la velocidad de un cuerpo en movimiento, se puede calcular la energía que adquiere debido a su movimiento. Rutherford acababa precisamente de hacer una estimación de la velocidad de las partículas alfa provenientes del radio, y la masa de cada una podía calcularse en forma muy plausible a partir de su razón de carga a masa, empleando el valor, obtenido por Thomson, de 2×10^{-20} abculombios para la carga transportada por un solo ion. Esto significaba que cada partícula alfa separada llevaba consigo algo así como 10^{-5} ergios de energía. (Un ergio es la cantidad de energía empleada para levantar un mosquito hasta una altura de unos quince milímetros.) De cálculos basados en la teoría cinética de los gases se desprendía que el número de átomos de un gramo de radio era 10^{20}, y Rutherford y Soddy sabían ya de cinco transmutaciones sucesivas por las cuales atravesaría cada átomo de radio. Considerándolas todas en conjunto, obtuvieron una cifra de 10^{8} (o sea cien millones) de calorías-gramo para el calor cedido por un solo gramo de radio antes de haberse transmutado hasta la inactividad. (Una caloría-gramo es la cantidad de calor necesaria para aumentar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua, y equivale a 42 millones de ergios de energía. La caloría empleada para la nutrición es mil veces mayor.)

Sentado que todo el cálculo estaba constituido por estimaciones de valores, 10^8 calorías-gramo eran algo incomparablemente mayor que las 4.000 producidas por la llama originada en la voraz combustión del hidrógeno en oxígeno puro cuando se formaba un gramo de agua. Las transmutaciones radiactivas ponían en juego una cantidad de energía bastante mayor que las combinaciones moleculares de la química corriente.

Esto no constituyó, sin embargo, el fin de los cálculos. Había otra dirección por seguir, un poco más intrincada, que comenzaba con la corriente total de iones que podía producir la emanación proveniente de la nueva muestra de radio de Rutherford y Soddy. En base a aquélla calcularon que un gramo de radio que mantuviera aprisionada su emanación, y de este modo retuviera dentro de su masa la sustancia correspondiente a la radiactividad inducida, tendría que emitir energía con una velocidad de 2×10^4 ergios por segundo, o sea, 15.000 calorías-gramo por año.

Estaba bastante claro que si el radio eliminaba energía a ese ritmo, aun los cien millones de calorías-gramo que se le habían asignado no durarían muchos miles de años. El radio que se extraía de la pecblenda debía ser mucho más joven que el mineral en el cual se encontraba.

Si el radio se transmutaba con esta rapidez en la escala geológica del tiempo, entonces quedaba claro por qué se había acumulado tan poca cantidad del mismo en los minerales de los cuales se lo extraía. No obstante, sus transmutaciones tenían que acabarse al fin; sus átomos tenían que entrar, finalmente, en la existencia estable de los elementos corrientes, y los productos estables resultantes, cualesquiera que fuesen, tenían que encontrarse en el mineral junto al

radio. Aquí Rutherford y Soddy señalaron el hecho curioso de que al helio, el más liviano de la familia de los gases inertes de Ramsay, siempre se lo encontraba aprisionado en los minerales radiactivos.

Luego pasaron a una especulación más amplia. Los átomos radiactivos liberaban energía, y ello en enormes cantidades. Sin embargo, no había razón para pensar que estos átomos de radio, de torio, o de uranio, fueran muy diferentes de los átomos de los elementos corrientes, o que toda su energía interna fuera eliminada por medio de sus rayos. Era muy verosímil que los átomos estables contuviesen también su depósito de energía almacenada, y si los procesos subatómicos existían para ponerla en libertad, entonces uno podría explicarse incluso la prodigiosa efusión de energía por parte del Sol.

Era un largo camino como para recorrerlo sólo con un poco de aritmética, pero por lo menos no habían exagerado, y esto se hizo patente antes de que sus cifras pudieran aparecer impresas.

En París el radio se acumulaba. El 21 de julio de 1902, cuando la teoría de la transmutación de Rutherford y Soddy apenas estaba en ciernes de ser impresa, Marie Curie había anunciado que el peso atómico del radio era 225, y esto lo hacía ubicarse muy acertadamente, en la Tabla Periódica, debajo del bario y en la misma fila que el torio y el uranio, exactamente como lo requería su comportamiento químico. Junto con esta muestra, que era absolutamente pura, el laboratorio de los Curie poseía otras en las cuales el radio y el bario aún estaban mezclados.

Con una de éstas, que pesaba alrededor de un gramo y quizás haya tenido una parte de radio por cada cinco de bario, Pierre Curie hizo un descubrimiento interesante: la muestra de radio estaba más caliente que el aire circundante. Con la ayuda de un

joven asistente de investigación llamado Albert Laborde, comenzó un trabajo cuidadoso.

Comparando la mezcla de cloruros de radio y de bario con un peso igual de cloruro de bario puro exactamente bajo las mismas condiciones, hallaron que la muestra de radio se mantenía a una temperatura superior en un grado y medio a la de la otra muestra. Comparando el frasco lleno de radio con una pequeña bobina de alambre, calentado eléctricamente y arrollado sobre un tubo del mismo tamaño, comenzaron a calcular qué cantidad de calor tenía que desarrollar el radio para alcanzar aquella temperatura. Luego, para mayor seguridad, verificaron la medición en un calorímetro de Bunsen, en el cual el calor del radio podía fundir un poco de hielo, y la disminución de volumen cuando el hielo se convertía en agua informaba exactamente qué cantidad de hielo se había transformado. La cifra a la que llegaron finalmente era de 14 calorías-gramo por hora.

Ésta era harto pequeña, pero no había mucho radio en la muestra que ellos poseían. De acuerdo con una estimación razonable de la cantidad presente, estaban en condiciones de afirmar que un gramo de radio puro produciría alrededor de 100 calorías por hora. Esto representa, si se hace la cuenta, alrededor de 880.000 calorías-gramo por año, o sea, casi 60 veces lo que Rutherford y Soddy acababan de calcular. Posiblemente habían sido moderados en sus cálculos; de ser así, los hechos de la materia no hacían más que reforzar los argumentos que de ella habían tomado.

Capítulo 9

El radio y el helio

El helio era un gas profundamente romántico. El primer indicio de su existencia se había presentado en 1868, durante un eclipse de Sol, cuando un electroscopio, recogiendo la luz de una protuberancia en el borde mismo del disco solar, había puesto de manifiesto una línea amarilla, muy próxima a la familiar línea del sodio. Posteriormente, cuando el astrónomo francés Pierre Jules César Janssen halló la manera de hacer que las protuberancias se destacaran, aun sobre el fondo blanco de la luz emitida por el astro solar, descubrió que la línea solar amarilla y la del sodio no estaban exactamente en el mismo lugar. La línea amarilla, como se puso de manifiesto, era sólo una de un grupo de líneas de diferentes colores cuyo brillo variaba, en conjunto, cuando las protuberancias hacían irrupción o se extinguían, y de este modo parecían estar relacionadas entre sí. El hecho curioso era que ninguno de los elementos conocidos producía precisamente un grupo semejante. El astrónomo Norman Lockyer y el químico Edward Frankland se asociaron para pasar revista a todos, pero después de la más cuidadosa búsqueda tuvieron que admitir

que no podían encontrar ningún elemento sobre la Tierra al cual pudieran pertenecer estas líneas. Con todo, en el Sol parecía existir un elemento que las producía, y por esta razón lo llamaron helio.

Luego en 1895, cuando el argón —el primero de los gases inertes— era aún un elemento nuevo, le fue señalado a Ramsay que cuando un mineral llamado cleveita se disolvía en un ácido liberaba un gas que podría ser argón. Ramsay encontró el gas con sobrada facilidad, y con la ayuda de Crookes obtuvo su espectro; pero resultó que no se trataba de argón sino de helio, el elemento solar, no identificado antes sobre la Tierra.

Ahora Rutherford y Soddy sugerían que el helio podría ser uno de los productos finales de la radiactividad, uno de los elementos en los cuales se transmutaban el uranio y el radio. En efecto, como el uranio, el radio, y el helio se encontraban siempre juntos, probablemente debían estar relacionados, y cuando Rutherford y Soddy se separaron en la primavera de 1903, se repartieron entre ambos el problema de cuál sería la relación. Soddy trataría de obtener radio a partir del uranio, y Rutherford, helio a partir del radio.

En la ciudad alemana de Braunschweig (que se transforma en Brunswick cuando se la menciona en inglés o en español), en la fábrica de quinina de *Buchler und Compagnie*, trabajaba un químico llamado Friedrich Giesel. Había recogido la sugestión de la primera comunicación de Marie Curie, y había comenzado a examinar los residuos de una refinería de uranio. Giesel había descubierto por sí mismo tanto el polonio como el radio, aunque siempre un poco detrás de los Curie, y solo hacía poco que había hallado que los bromuros actuaban con mayor rapidez que los cloruros, en las precipitaciones fraccionadas para separar el radio del bario. Para 1903, ofrecía en venta, en la fábrica de quinina, bromuro de radio muy puro a precios muy razonables.

Ramsay había comprado alguna cantidad, y tan pronto como Soddy llegó de Montreal lo puso a trabajar con aparatos para obtener el espectro de la emanación del radio. Esto era completamente razonable. Ramsay había compartido el descubrimiento del argón con el físico Lord Rayleigh, pero a los otros gases de su familia —helio, neón, criptón, y xenón— les había dado caza él mismo. Ahora él sabía cómo manejar diminutas burbujas de gas, y cómo producir sus espectros; Soddy, por su parte, tenía experiencia con el radio. Entre ambos podían vérselas con este nuevo e inerte gas radiactivo que Rutherford había llamado emanación.

Desgraciadamente, el experimento se malogró; el único espectro que observaron pertenecía al dióxido de carbono, que se había introducido debido a algún accidente de contaminación. Lo separaron congelándolo con aire líquido, y por supuesto condensaron también la emanación. Luego, como Soddy confiadamente esperara, salió a relucir la famosa línea amarilla del helio. Rutherford estaba de vacaciones ese verano y, casualmente, se encontraba en Londres en ese día particular. Había comprado una cierta cantidad del bromuro de radio de Giesel para la Universidad de McGill, y estaba más que deseoso de prestárselo a Ramsay y Soddy para un segundo intento. Esta vez observaron la totalidad de la media docena de líneas del helio, distribuidas por todo el espectro, desde el rojo hasta el violeta.

Solo había una interpretación posible, ya que el helio era uno de los gases que no se combinaban con nada. No había modo por el cual el radio pudiera haberlo traído consigo desde el mineral originario, y

tampoco podía haberlo capturado del aire. El helio que resplandecía bajo el efecto de las chispas de Ramsay tendría que haber surgido a la vida como gas dentro de los cristales sólidos del bromuro de radio, y para estar aprisionado en ellos tendría que haberse formado después de que estos cristales se hubieran solidificado a partir de la última solución usada para su purificación.

El radio era ya un elemento, un indiscutido elemento con su propia química, su propio espectro, y su propio peso atómico. El helio también era un elemento, exactamente en los mismos términos. Por lo tanto, había una evidencia clara y directa de que el helio se formaba a partir del radio, que un elemento se transmutaba efectivamente en el otro. ¿Quién hubiera podido, después de esto, mostrarse incrédulo ante las ideas que Rutherford y Soddy habían propuesto tan cautelosamente sólo quince meses antes?

Capítulo 10

El calor y el alfabeto del radio

Cuando Rutherford abandonó Londres se dirigió a París, encontrándose con los Curie el día en que la tesis doctoral de Marie Curie había sido aceptada en la Sorbona. Luego se estableció en Gales, donde llovió constantemente, y finalmente regresó a Montreal con los treinta miligramos de bromuro de radio que había comprado a Giesel. Una vez allí, lo primero que intentó fue medir la producción de calor del bromuro, y tratar de hallar la razón de la discrepancia entre su estimación y las mediciones de Pierre Curie. Aun cuando esto pudiera significar sólo que él y Soddy habían sido cautelosos en sus apreciaciones, podría significar también que habían interpretado erróneamente lo que sucedía, y que las sustancias radiactivas eliminaban energía mediante otra cosa, distinta de sus partículas alfa.

Lo que ahora Rutherford quería hacer, era ver con qué exactitud se correspondían el calor producido por el radio y los rayos ionizantes que éste emitía. Se asoció con Howard Barnes, un especialista en mediciones de calor, que había sido llevado a McGill por Hugh L. Callendar, el predecesor de Rutherford.

Tomaron el bromuro de radio y lo calentaron intensamente para separar toda la emanación aprisionada, condensándola en una pequeña redoma de vidrio por medio de aire líquido, y encerrándola herméticamente allí mismo. Luego, alternativamente, midieron el calor producido por el radio sin la emanación y por la emanación sin el radio. Durante las pocas primeras horas, la producción de calor por parte del radio disminuyó al hacer lo propio la actividad del depósito dejado por la emanación (que era la 'radiactividad inducida' de los primeros tiempos de Rutherford). Durante el mismo lapso, el calor del tubo con emanación aumentaba al irse asentando sobre sus paredes un depósito activo fresco. Entonces comenzó a ganar terreno la nueva emanación formada en el interior de la masa de bromuro de radio, y la constante disminución de actividad de la emanación separada comenzó a hacerse notar. En el tubo con emanación la producción de calor decrecía geométricamente, en el bromuro de radio aumentaba del mismo modo; en ambos casos con un semiperíodo de cuatro días.

Esto era precisamente lo que harían las radiactividades de estas dos muestras, si se las midiera en base a las partículas alfa emitidas. Por lo tanto, fuera de toda discusión, las partículas alfa eran los principales portadores de la energía radiactiva, y ésta era liberada por los átomos en el momento de su transmutación. Era también sumamente satisfactorio para Rutherford y Barnes el ver que, mientras que la producción de calor en uno de los tubos iba en aumento, y la del otro en disminución, la suma de ambas cantidades se mantenía constante. La nueva emanación aprisionada en el bromuro de radio reponía exactamente lo que se había perdido por transmutación en el otro tubo, precisamente como lo exigía la teoría de la transmutación.

(En la época en que estas mediciones fueron concluidas, en diciembre de 1903, se anunció en Estocolmo que el Premio Nobel de Física de ese año sería compartido por Becquerel y los Curie.)

A continuación Rutherford y Barnes se volvieron hacia el depósito activo que dejaba la emanación del radio. En esta ocasión, una vez más la producción

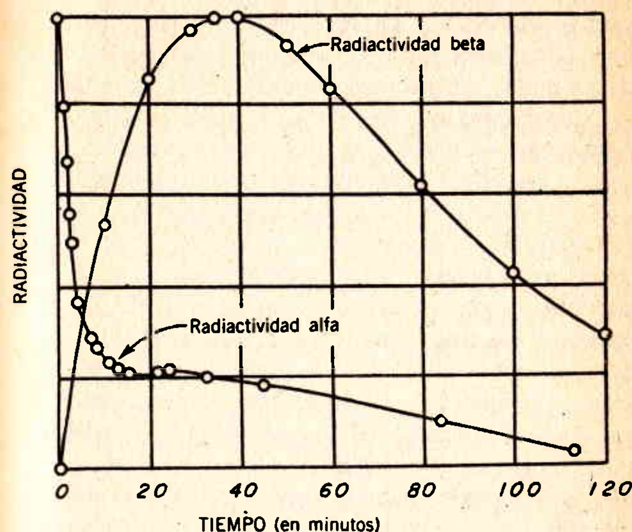


FIG. 14. *Radiactividad alfa y beta del depósito dejado por la 'emanación' del radio.*

de calor correspondió exactamente a la emisión de partículas alfa (radiactividad alfa), y ésta, como Rutherford sabía desde que había comprado radio por primera vez, se extinguía en una forma bastante complicada. Al comienzo había una disminución geométrica con un semiperíodo de tres minutos. Había otra, al final, que insumía alrededor de treinta minutos para reducir la emisión a la mitad. Entre ambos

valores, y durante veinte o treinta minutos, la radiactividad se mantenía constante (fig. 14).

Era evidente que en esto estaban implicadas dos sustancias diferentes, la de los tres minutos del comienzo (en la cual, evidentemente, se transmutaba la emanación), y la de los treinta minutos, que se manifestaba al final. También se podía deducir, si se observaba atentamente, que había además una tercera sustancia. La sustancia de los treinta minutos no crecía tan rápidamente como desaparecía la de los tres minutos; además estaba el intervalo de radiactividad constante que 'separaba' a ambas, y éste debía representar un período en el que la primera se extinguía lentamente y la última aún continuaba creciendo.

Al considerar la emisión de partículas beta (radiactividad beta) el argumento se volvía un poco más claro. Al comienzo, un depósito activo no emitía partículas beta en absoluto; evidentemente la sustancia de los tres minutos solo emitía partículas alfa. Si el elemento en el cual se transmutaba la emanación se reducía a la mitad en tres minutos, entonces en el mismo lapso tendría que haberse formado la mitad del total del elemento que aquél producía (y que era el segundo de la cadena). Podía esperarse, entonces, que la actividad beta del depósito crecería con la misma rapidez con que disminuían las partículas alfa, pero el hecho es que aumentaba más lentamente, y sólo en forma gradual se estabilizó en un valor de treinta minutos (correspondiente al semiperíodo de disminución de la actividad)..

Por todo esto parecía necesario concluir que el primer elemento del depósito activo, aquél en el cual la emanación se transformaba directamente, emitía partículas alfa pero no beta, y se reducía a la mitad, por transmutación, en tres minutos. El segundo elemento no emitía ni partículas alfa ni beta, pero,

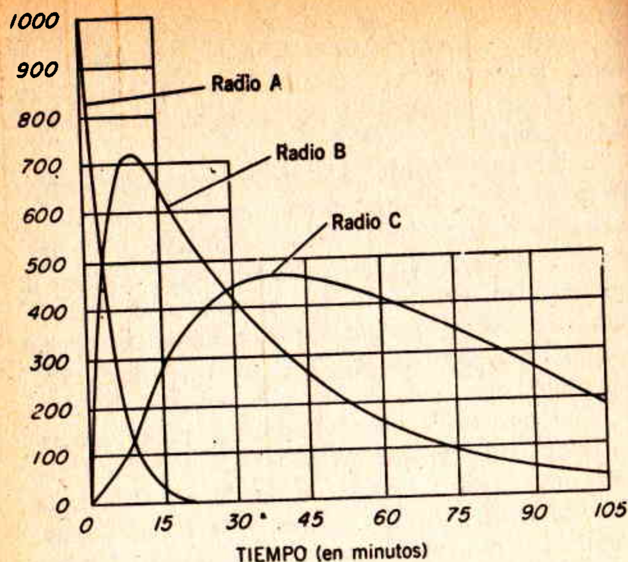
transmutándose sin ostentación, se reducía a la mitad en treinta y cuatro minutos. El tercer elemento de la serie emitía tanto partículas alfa como beta, y llevaba a cabo la mitad de su transmutación en veintiocho minutos.

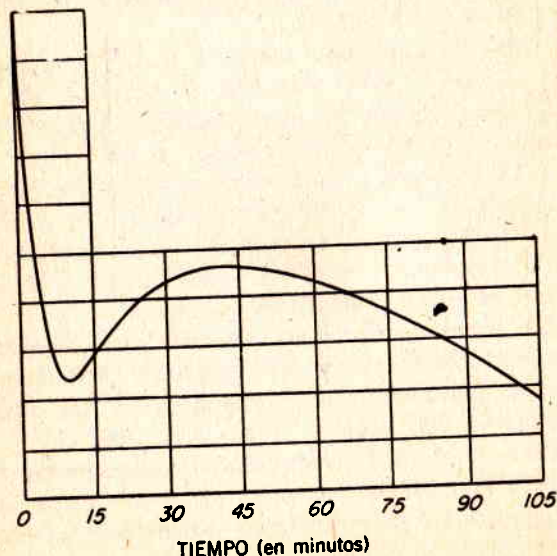
Pierre Curie había sido muy remiso en aceptar la teoría de la transmutación. Se sentía molesto a causa de los tipos transitorios de materia a los que recurría la teoría, y prefería, mucho más, explicar la radiactividad temporaria por un proceso de transferencia de energía. Lo que lo hizo cambiar de opinión fue, más que nada, su propio éxito al repetir el experimento de Ramsay y Soddy, y el ver al helio crecer en el interior de una cierta cantidad de radio parisiense. (Esto no había sido del todo fácil, y Pierre Curie había necesitado la ayuda de Sir James Dewar, de la *Royal Institution* de Londres, y de Henri Deslandres, del Observatorio de Astrofísica de Meudon, para obtener un espectro que no estuviera encubierto por gases contaminantes.)

Una vez que hubo aceptado la teoría, comenzó en el acto a medir y analizar la actividad alfa del depósito originado en la emanación del radio, y lo hizo de un modo muy análogo al de Rutherford. Estableció que la emanación se transformaba en una sustancia *A* con un semiperíodo de 2,6 minutos, la cual se transformaba en otra, *B*, con un semiperíodo de 21 minutos, y ésta, a su vez, en una sustancia *C* con un semiperíodo de 28 minutos.

Las letras eran muy convenientes para diferenciar un elemento del otro, y en el verano de 1904 Rutherford las había adoptado, llamando a las tres sustancias, por orden, radio A, radio B, y radio C.

Hasta ahora nos hemos atenido a argumentos verbales referentes a la naturaleza de estos tres elementos, pero los argumentos matemáticos eran aún más





convincentes. No era difícil plantear ecuaciones ('ecuaciones diferenciales', en el lenguaje de la matemática) para evaluar el crecimiento de un elemento radiactivo al transmutarse el elemento anterior, y su desaparición, al mismo tiempo, por transmutación en el elemento siguiente de la cadena, y para comparar uno de estos procesos con el otro. Una vez planteadas las ecuaciones, podrían ser resueltas, y trazarse curvas a partir de sus soluciones, a fin de mostrar qué cantidad de un elemento podría estar presente en un instante particular. Rutherford podría admitir, para tomar un caso sencillo, que comenzaba nada más que con radio A. Partiendo de esto podría trazar tres curvas para mostrar con qué rapidez el radio A se transmutaba y el radio B crecía a expensas de éste, y con qué lentitud se presentaba luego el radio C (fig. 15).

Rutherford había supuesto que sólo el radio A y el radio C emitían partículas alfa. Si éstas eran iguales en cuanto a poder de ionización, entonces, si sumaba las curvas que acababa de trazar para el radio A y el radio C, la curva compuesta daría la disminución de las partículas alfa del depósito. Lo que resultó era aproximadamente similar a las curvas que había representado en base a sus anteriores experimentos, y si se observa cuidadosamente se pueden ver las razones de la diferencia. La prominen-

FIG. 15. *Predicción de las transmutaciones.* Las curvas del gráfico de arriba muestran el número de átomos de radio A, radio B, y radio C que, según los cálculos, existiría en cualquier momento de un proceso de transmutación que se iniciara con 1.000 átomos de radio A. Rutherford obtuvo la curva del gráfico de abajo sumando las curvas del radio A y del radio C del diagrama de arriba, para así obtener la radiactividad alfa del depósito activo.

cia de la curva del 'radio A más radio C' es mucho más elevada que en la curva experimental, y esto significa que en aquellas mediciones anteriores el radio C producía una ionización menos intensa que el radio A. En la curva experimental la prominencia se presenta antes, en el tiempo, y esto significaría que había habido un largo período de recolección del depósito activo, de modo que el radio C había comenzado a acumularse antes de iniciarse las mediciones.

El depósito activo dejado por el radio agonizaba después de unas pocas horas, y al principio se había supuesto que éste era el fin de su radiactividad; pero luego los Curie observaron que los depósitos antiguos volvían a ser activos. Habiendo acabado con los radios A, B, y C, en los primeros meses de 1904, Rutherford comenzó a investigar este efecto. Poseía algunos depósitos considerablemente ricos en los tubos con emanación que había utilizado en sus experimentos sobre el calor; los extrajo por disolución y comenzó a observar lo que hacían. Del nuevo material surgían tanto partículas alfa como beta, evidenciando una radiactividad que disminuía muy lentamente, si es que en realidad no se mantenía constante.

Podía tratarse del polonio, puesto que, como se lo extraía de los mismos minerales que el radio, posiblemente descendiera de éste. De un modo harto extraño, esta afirmación bastante hipotética era la única cosa cierta que se podía decir acerca del polonio.

Marie Curie lo había extraído a la par del bismuto, y de acuerdo con su información el polonio solo emitía partículas alfa, evidenciando una radiactividad de vida bastante larga. Giesel (quien había preparado el bromuro de radio puro que Rutherford usaba en aquel momento, así como el que había per-

mitido a Ramsay y Soddy observar su primer espectro del helio) estaba también acostumbrado a extraer el polonio a la par del bismuto, pero el material obtenido emitía partículas beta y tenía una vida bastante corta. Además estaba el radiotelurio, que el profesor Willy Marckwald, de la Universidad de Berlín, había descubierto en los residuos provenientes de Joachimsthal cuando la firma química del doctor Richard Sthamer le encomendó la investigación de dichos residuos con vistas a encontrar algo con valor comercial. Al igual que el polonio de los Curie, sólo emitía partículas alfa, y Marckwald sostuvo que poseía una radiactividad permanente. Se había esmerado bastante para probar que no se trataba de bismuto (y por lo tanto no era probable que fuera polonio); su demostración más convincente consistía en que, cuando una varilla de bismuto era sumergida en una solución que contenía radiotelurio, éste se depositaba rápidamente sobre la superficie del bismuto. (Una aguja de hierro haría la misma jugarreta, recubriéndose con cobre al ser sumergida en una solución portadora de cobre. Este es un signo de que el metal sumergido es considerablemente más apto para disolverse en agua o en ácidos débiles que el que se deposita.)

La experiencia química de Marckwald era la más fácil de intentar, y cuando Rutherford sumergió una varilla de bismuto en la solución del depósito activo, aquélla volvió con actividad alfa. Lo que era más aún, el poder de penetración de sus rayos alfa coincidía perfectamente con el de una muestra adecuada de radiotelurio que él había comprado. Muy pronto descubrió, también, que la actividad alfa de su solución crecía lentamente, lo cual producía la impresión de que la sustancia beta-emisora contenida

en la solución fuera la antecesora inmediata del radiotelurio.

Otro material que originaba confusión era el radioplomo. Se lo extraía de la pecblenda mediante los procesos químicos de obtención del plomo, y los informes acerca de su radiactividad eran por lo menos tan confusos como los referentes al polonio. Rutherford poseía una muestra preparada por Bertram B. Boltwood, un ex químico de la Universidad de Yale que ahora se ocupaba de la investigación en su propio laboratorio privado. Cuando Rutherford la disolvió, y sumergió en ella la varilla de bismuto, volvió a extraer el material alfa-emisor, dejando tras de sí algo que emitía rayos beta.

A lo largo de estas investigaciones, Rutherford estaba recolectando información sobre los depósitos activos. Su labor de rutina consistía ahora en exponer a la emanación, durante cuatro días, una tira de platino cargada negativamente. Después de esto, la actividad beta de la tira crecía según el familiar modo geométrico, recorriendo en seis días la mitad de la distancia que le faltaba hasta un valor futuro y constante. Esto significaba que había algo sobre el platino que no emitía rayos beta, y que se transmutaba, a una velocidad constante, en una nueva sustancia que sí lo hacía. La nueva sustancia, que emitía los rayos beta, contaba, para su transmutación, con un semiperíodo de seis días.

Con el tiempo la tira presentaba una actividad alfa, y si entonces Rutherford la calentaba, las partículas alfa desaparecían, mostrando que la sustancia que las emitía se había evaporado. Al mismo tiempo, la actividad beta detenía su crecimiento e iniciaba una disminución corriente, geométrica, de seis días; y esto significaba que su precursora también se había evaporado. Si ahora Rutherford esperaba, las

partículas alfa reaparecían al reducirse aún más las beta provenientes de la tira, y esto dejaba en claro que el emisor beta con semiperíodo de seis días se transmutaba en el material alfa-emisor.

Introduciendo los nombres alfabéticos, parecía que el radio C se transformaba en un radio D que no emitía rayos y poseía una vida bastante larga. El radio D se convertía en radio E, que emitía partículas beta y tenía un semiperíodo de seis días; y el radio E pasaba a radio F, que emitía partículas alfa y tenía un semiperíodo de 143 días (fig. 16).

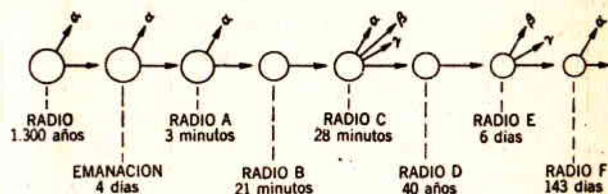


FIG. 16. *La cadena de transmutaciones del radio.*

En la Universidad de Viena había un equipo capaz de investigadores de la radiactividad: Stefan Meyer, un físico, y Egon von Schweidler, un fisicoquímico. Habían estado estudiando el radiotelurio, y dieron un valor de 135 días para el semiperíodo de su radiactividad. Marckwald, después de un debate público con Soddy, había llegado a la conclusión de que ninguna radiactividad podría ser realmente permanente, y había puesto a dos jóvenes físicos, llamados Heinrich Greinacher y Karl Herrmann, a trabajar sobre el radiotelurio que él había preparado. Obtuvieron un semiperíodo de 139,8 días. Era cierto, entonces, que el radio F y el radiotelurio eran lo mismo.

Quedaba la duda de si 'polonio' era un tercer nombre de la misma sustancia. Marie Curie insistía que sí, pero Marckwald permaneció inseguro hasta que las mediciones realizadas por ella, sobre el polonio extraído por sus propios métodos químicos, dieron un semiperíodo de 140 días. Entonces asintió, y retiró el nombre de radiotelurio. "... una rosa con cualquier otro nombre tendría el mismo dulce aroma", declaró, y esta rendición shakespeariana encantó tanto a Rutherford que estuvo pregonando la cita de un lado a otro del laboratorio durante una semana.

En cuanto al polonio beta-emisor de Giesel, resultó que su actividad disminuía con un semiperíodo de seis días, así que era lo mismo que el radio E. El radio D resultó ser la sustancia que se extraía como radioplomo, y debido a que el radio D originario se convertía constantemente en radio E, el cual se transformaba con bastante rapidez en radio F, la confusión de los anteriores químicos quedó fácilmente explicada. Cuanto más tiempo esperaban entre cada operación, tanto más complicadas se volvían sus muestras.

En la primavera de 1905 Rutherford ya había desarrollado la cadena de transmutaciones, aunque la controversia sobre el polonio continuó hasta el verano de 1906. La teoría de la transmutación había sido muy útil para resolver las confusiones de la radioquímica, pero no era éste el límite de sus poderes. Podía sugerir una identidad plausible para el descendiente no radiactivo del radio F.

Boltwood había estado analizando minerales radiactivos con gran cuidado, y la notable proporción de plomo que todos ellos contenían le pareció interesante. Podía tratarse de la acumulación del radio consumido, que se había transmutado pasando por

la emanación y todo el alfabeto desde la A hasta la F; y esto, como lo señaló Rutherford, era muy plausible. Teniendo en cuenta el radio, la emanación, el radio A, el radio C, y el radio F, a lo largo de la cadena surgían cinco partículas alfa. A partir del experimento de Ramsay y Soddy, había sido razonable pensar que las partículas alfa pudieran ser átomos de helio, y como el helio tenía peso atómico 4, cinco partículas alfa se llevaban veinte unidades de peso atómico. Como el radio tenía peso atómico 225, el elemento que quedaba después de la transmutación del radio F tendría peso atómico 205, que no estaba muy lejos del valor 206,7 que los químicos daban para el peso atómico del plomo.

Resultaba fascinante, como idea, el pensar que el vulgar y opaco plomo de los plomeros pudiera tener un pasado radiactivo.

Capítulo 11

La ascendencia del radio

El radio no había sido hallado en lugar alguno salvo en los minerales de uranio, y como su vida se medía en miles de años, geológicamente breves, tendría que haberse formado en el interior del mineral, y a partir de su sustancia. El único material posible del cual podía provenir era el uranio mismo.

Una cosa era imaginar este argumento, y otra, probarlo. Soddy había comenzado, con sobrada confianza, apenas hubo llegado al laboratorio de Ramsay, en Londres. Disolvió en agua un kilogramo de nitrato de uranilo, mezcló ácido sulfúrico, y agregó, gota a gota, una solución de nitrato de bario. Era de esperar que el sulfato de bario que precipitaba instantáneamente arrastrara consigo todo el radio que pudiera estar presente, y en aras de la seguridad repitió el proceso varias veces. Luego tapó el frasco, esperó una semana para que se acumulara la emanación de cualquier postrer residuo de radio, insufló aire a través de la solución para extraer la emanación acumulada, y midió su radiactividad con un delicado electroscopio de hoja de oro. En otro frasco fabricó una solución con una porción, cuidadosamente pesada, de bromuro de radio puro; insufló aire a través de la solución, y midió la emanación del mismo modo. Comparando los resultados se aseguró de que no había dejado más de 10^{-11} gramos de radio en el kilogramo de nitrato de uranilo, y, una vez sabido esto, apartó el frasco para dejar que el uranio se convirtiera en radio.

Por desgracia, en esa época Ramsay estaba sumido en sus experimentos sobre la emanación, y entre la emanación empleada que él descargaba en el aire, y la que simplemente se filtraba, las paredes y el techo del laboratorio, y cada pieza de los aparatos, habían recogido un revestimiento formado por el depósito activo. Los electroscopios y los electrómetros se descargaban espontáneamente, y se hacían imposibles las mediciones delicadas. No fue sino hasta el otoño de 1904, cuando se estableció en un limpio laboratorio propio en la Universidad de Glasgow, que Soddy pudo hacer algún progreso. Allí, para su decepción, encontró que el poco radio que podía detectar en su nitrato de uranilo era menos de la quingentésima parte de lo que había esperado.

Ahora bien, había otro modo para tratar de hallar si el radio descendía del uranio, que consistía en descubrir si la proporción de radio a uranio en diferentes minerales era fija o no. El argumento en el cual se basaba surgía de la ley geométrica de la transmutación radiactiva. Ésta se expresaba, generalmente, diciendo que la mitad de un elemento particular se transmutaba en tantos minutos, u horas, o días. La mitad sólo era una fracción conveniente, y de hecho el mismo tipo de enunciado podría hacerse usando cualquier otra. (La emanación del radio, cuya mitad se transmutaba en cuatro días, transmutaba su sexta parte en 25 horas, y su décima parte en 14,5.) La ley podría también enunciarse diciendo

que, durante un espacio de tiempo particular, un segundo, una hora, o un año, siempre se transmutaba una fracción definida del elemento. (Para la emanación del radio, ésta sería de 72 diezmilésimos al cabo de una hora, o 168 milésimos al cabo de un día.)

Para el uranio, dentro de cualquier espacio de tiempo razonable, la fracción correspondiente era increíblemente diminuta. Para cualquier propósito práctico no era aventurado decir que, de año a año y de siglo a siglo, el número de átomos de uranio que se transmutaban permanecía idéntico. Como ya hemos visto varias veces, cuando hay una transmutación constante de un elemento radiactivo se produce una acumulación gradual (hasta un cierto valor fijo) del elemento siguiente de la cadena. Este valor fijo se alcanzaría, por ejemplo, cuando se transformaran en emanación tantos átomos de torio X como los que se crearan a partir del torio, o se convirtieran en radio F tantos átomos de radio E como los que se estuvieran produciendo a partir del radio D. Como el número de átomos que se transmutaban era siempre una fracción fija de los existentes, se deducía que la cantidad que finalmente se acumularía, del elemento siguiente de la cadena, sería inversamente proporcional a la fracción que de él se transmutara en un cierto lapso.

Todo esto estaba enteramente claro para Herbert N. McCoy, un joven químico de la Universidad de Chicago, aunque hay que admitir que la argumentación resulta más simple a través del cálculo. McCoy comenzó las mediciones necesarias durante el invierno de 1903-4, mientras en Londres Soddy se preparaba para producir el radio directamente. Las mediciones se desarrollaron con lentitud, puesto que McCoy necesitaba asegurarse de que sus cámaras

de ionización medían lo que él quería, y en última instancia eso significaba tener en cuenta las partículas alfa absorbidas por la muestra misma. Luego, para cada muestra tenía que pasar por el tedioso proceso de un análisis cuantitativo, realizando cada operación química con tanto cuidado y destreza que la muestra que pesaba al final contendría, seguramente, cada pizca del uranio del cual había partido, pero ninguna otra cosa más.

Una vez que hubo terminado, en la primavera de 1905, pudo decir con una buena dosis de autoridad que, en los cinco minerales de pecblenda que había estudiado, la radiactividad total era exactamente proporcional a la cantidad de uranio contenido en el mineral. Esto significaba que cada elemento radiactivo del mineral, radio incluido, existía en una proporción fija respecto del uranio, y por lo tanto todos ellos debían de haber descendido de él.

Lo que McCoy había observado en la teoría de la transmutación de Rutherford y Soddy también lo había visto Boltwood, de New Haven, pero se las ingenió para centrar su ataque más directamente en el radio. Lo que hizo fue disolver el mineral en ácido, hervir la solución, medir la radiactividad de la emanación transportada por el vapor desprendido, y de este modo estimar la cantidad de radio contenido en el mineral. Al igual que McCoy, encontró el radio y el uranio en proporciones completamente fijas, primero en cinco minerales diferentes, después en ocho, y finalmente en dieciséis, provenientes de depósitos distribuidos por toda la superficie de la Tierra. Simultáneamente, descubrió que la proporción de torio a uranio variaba en forma notable entre un mineral y otro, por lo que estos dos elementos debían ser radiactivamente independientes.

Estaba claro, entonces, que el radio descendía del

uranio, pero el fracaso de Soddy, al tratar de producir alguna cantidad de aquél, también dejaba en claro que no era un descendiente muy directo. Tendría que estar interponiéndose algún otro elemento con un período de transmutación muy largo.

La idea le interesó a Boltwood, y primero pensó en el actinio. Éste era otro de los elementos obtenidos de la pecblenda, y había sido descubierto en los residuos provenientes de Joachimsthal por André Debierne, en 1899, cuando apenas había comenzado a trabajar para los Curie. Boltwood poseía una cierta cantidad de actinio, que había extraído, en una oportunidad, de una carnotita de Colorado y por el proceso de Debierne. La exhumó y tuvo la satisfacción de encontrar que podía obtener, por medio de la ebullición de su solución, una cantidad identificable de emanación de radio. Luego la purificó cuidadosamente, la encerró herméticamente en una redoma de vidrio, y la apartó hasta pasado el verano de 1906. Seis meses después quebró el encierro y ahora la emanación le informó que, durante el medio año de espera, habían aparecido $8,5 \times 10^{-9}$ gramos de radio.

Esto era demasiado éxito, ya que Boltwood había medido la radiactividad total de los minerales de uranio, y sus propias cifras mostraban que el actinio contribuía muy poco a dicha radiactividad, mucho menos de lo que correspondería a un antecesor inmediato del radio. Fue Rutherford quien encontró la raíz de la dificultad cuando trató de repetir por sí mismo el experimento de Boltwood. A partir del actinio había una cadena de transmutaciones, pasando por un radioactinio y un actinio X hasta una emanación de vida muy corta y un depósito activo (fig. 17). Observando el aumento y la disminución de la actividad en las diversas soluciones que había obtenido, Rutherford halló que el radio se producía en una solución que no contenía actinio sino sólo radioactinio, y, para empeorar las cosas, que la producción de radio era más lenta que la transmutación del radioactinio.

Como el antecesor inmediato del radio se encontraba con seguridad en el mismo lugar en que se producía el radio, su química tenía que ser semejante a la del radioactinio. Basándose en esta idea, Boltwood lo aisló en los comienzos de 1907. Se lo obtenía, como correspondía, de minerales de uranio; los procesos que daban resultado con el torio eran eficientes para extraerlo; poseía una elevada radiactividad alfa, y emitía cantidades siempre crecientes de emanación producida por el radio. Sus partículas alfa poseían un poder de penetración notablemente bajo. La combinación de sus comportamientos químico y radiactivo lo hacía parecer algo tan distinto de cualquier otra cosa, que Boltwood se sintió seguro como para aventurar un nombre y lo llamó ionio, defendiéndolo como nuevo elemento.

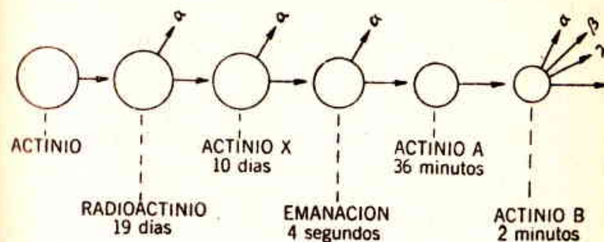


FIG. 17. *La cadena de transmutaciones del actinio.*

En el verano de 1908 quedó completamente en claro que Boltwood estaba en lo cierto. Marckwald y un alumno suyo llamado Bruno Keetman confirmaron el descubrimiento extrayendo, de otro mine-

ral de uranio, lo que sin lugar a dudas era el ionio de Boltwood. Lo único singular era su comportamiento químico, que aparecía como una imitación extraordinariamente fiel de la química del torio.

Capítulo 12

Números, partículas alfa, y el helio

En 1905, mientras se desarrollaban los experimentos con los radios D, E, y F, Rutherford tuvo éxito al medir la corriente de electricidad positiva transportada por un flujo de partículas alfa. Era, básicamente, un experimento muy simple. Disolvió un poco de bromuro de radio en una gran cantidad de agua, dejó que parte de esta solución se evaporase sobre una placa de metal, depositando una capa de bromuro de radio suficientemente delgada como para dejar pasar la mayor parte de las partículas alfa, y luego colocó otra placa de metal, frente a la anterior, para capturar las partículas alfa y registrar las cargas que llevaban consigo.

En la práctica hubo dificultades. Las placas tenían que estar colocadas en un vacío impecable, puesto que cualquier cantidad de aire entre las dos placas produciría iones suplementarios e introduciría confusión en las mediciones. Aún así, las partículas alfa fracasaron en contribuir con sus cargas positivas, y ello por una razón que resultó ser sumamente curiosa. Solo la mitad de las partículas alfa alcanzaban a salir disparadas de la placa de partida

(puesto que el bromuro de radio las emitía igualmente en cada sentido). La otra mitad era disparada hacia el interior de la placa, donde desalojaba, como una especie de salpicadura atómica, cantidades de electrones lentos. Una vez que supo esto, Rutherford colocó a estos electrones bajo control por medio de un campo magnético intenso que los desviaba en redondo, y los volvía nuevamente a la placa de la cual provenían.

Entonces las partículas alfa llegaban solas y podían ser medidas. Sobre la placa de partida se encontraban 0,484 miligramos de bromuro de radio, lo cual no había sido determinado pesando una cantidad tan diminuta sino comparando sus rayos gamma con los de una muestra mayor y más manuable. (Los rayos gamma eran una variedad de rayos muy penetrantes, y solo eran emitidos en algunas pocas transmutaciones radiactivas. Ionizaban débilmente y eran de detección bastante difícil, pero su poder de penetración los hacía ideales para comparaciones como aquélla, puesto que no importaba si la muestra con la cual se trabajaba estaba encerrada herméticamente en el interior de un tubo de ensayo, o distribuida sobre un platillo abierto.) Las partículas alfa de la muestra empleada para la experiencia transportaban sus cargas a razón de $9{,}8 \times 10^{-13}$ culombios por segundo. Supongamos que cada partícula alfa tuviera una carga eléctrica elemental (que las últimas mediciones de Thomson establecían en $1{,}13 \times 10^{-19}$ culombios); entonces esta corriente eléctrica conduciría a un cálculo final de $6{,}2 \times 10^{20}$ partículas alfa emitidas al cabo de cada segundo por un gramo de radio puro. Este es, sin lugar a dudas, un número grande (10^{20} serían cien millones de billones), pero el número de átomos que integraba un gramo de radio era aún mayor. A la velo-

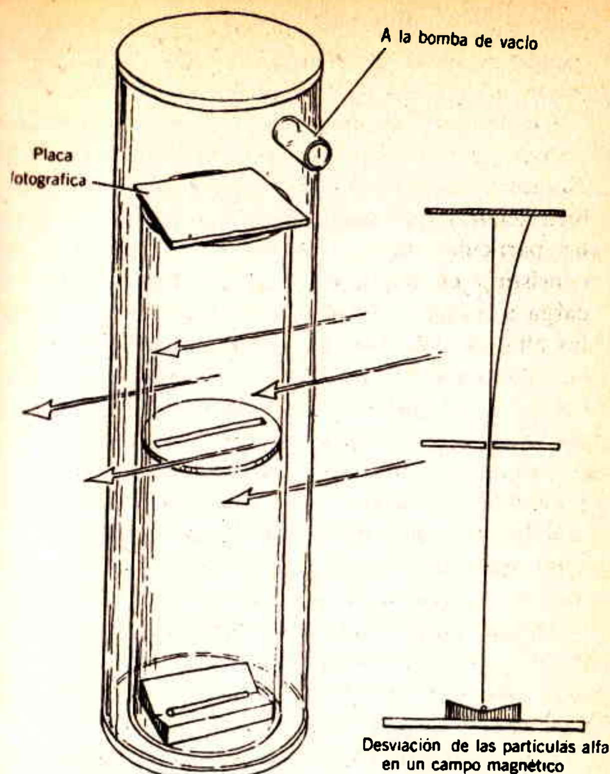


Fig. 18. *Medición de la razón de carga a masa de las partículas alfa.* Las partículas alfa provenían del revestimiento de radio C aplicado sobre un alambre de platino colocado en el bloque en forma de V, en el fondo del recipiente en cuyo interior se había hecho el vacío. Las partículas pasaban a través de la ranura de la pantalla de metal, y a través de un campo magnético, registrándose sobre la placa fotográfica. La ranura limitaba el haz de partículas. El campo magnético, indicado con flechas, curvaba el haz. A partir de la ubicación del alambre de platino, de la ranura en la pantalla, y de la línea negra revelada sobre la placa fotográfica, Rutherford pudo calcular la curva seguida por el haz.

cidad mencionada solo se transmutarían, por segundo, 54 de cada cien mil de tales átomos, y el semiperíodo del radio resultaría de 1.280 años.

Este era un cálculo todo lo correcto que hubiera sido posible, pero no obstante había aún mucho de hipotético en él. Para haberlo hecho mejor Rutherford tendría que haber sabido algo más acerca de las partículas alfa, de modo que su próxima tarea consistiría en mejorar su medición de la razón de carga a masa. La mejor manera de obtener partículas alfa, con el radio que entonces poseía, era exponer a la emanación un trozo de alambre de platino, dejar que el radio A depositado se transmutara, y usar las partículas emitidas por el radio C. Rutherford montó un alambre así preparado debajo de una pantalla de metal provista de una ranura (paralela al alambre) y colocada en un campo magnético (también paralelo al alambre). Una placa fotográfica, situada a una cierta distancia por sobre la ranura, reveló una angosta línea de ennegrecimiento, y a partir de la posición del alambre, de la ranura, y de la línea, resultó fácil trazar la curva seguida por las partículas alfa (fig. 18).

Esto era la mitad del experimento, pero la segunda mitad era la más trabajosa: obtener un campo eléctrico que desviara las partículas alfa sin hacer saltar chispas. Parte de la solución radicaba en un vacío realmente bueno; el resto se logró con ingenio. El campo eléctrico que Rutherford necesitaba se establecería entre dos placas de metal cargadas con tipos opuestos de electricidad. Haciendo que estas placas fueran suficientemente largas, de modo que las partículas alfa recorrieran una buena distancia entre ellas, se aseguró de que cada partícula invertía un tiempo razonable para cruzar el campo. Como cada una de ellas iba siendo empujada hacia

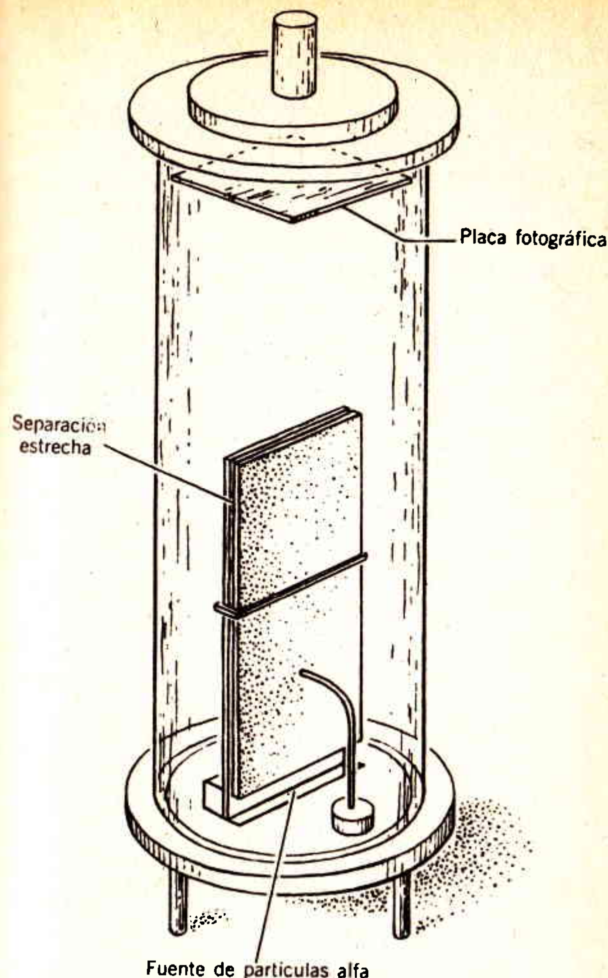


FIG. 19. *Segunda etapa en la medición de la razón de carga a masa de las partículas alfa.* Las partículas alfa se desplazaban a través de la estrecha separación entre dos placas cargadas, y proseguían hasta la placa fotográfica. El campo eléctrico desviaba las partículas.

un costado, por acción del campo, durante todo el período de su travesía, un suave empujón de un campo moderado podría terminar por producir una desviación bastante grande. Al ir desarrollando el aparato, Rutherford encontró que también valía la pena colocar las placas de desviación muy cerca una de la otra. Como lo habían mostrado experimentos de treinta años atrás, en un buen vacío las chispas requieren una distancia considerable para producirse, pero simplemente no transponen una separación pequeña (fig. 19).

Para el verano de 1906, Rutherford había concluido. La razón de carga a masa resultó de 5.100 abculombios por gramo. Esto hacía que fuera casi la mitad de la razón correspondiente al más simple ion conocido, el ion de hidrógeno de la electrólisis, que había adquirido su carga positiva al entregar un electrón. Para reducir a la mitad cualquier razón de carga a masa, hay que dividir por dos la carga, en el numerador, o duplicar la masa, en el denominador; pero para la razón de carga a masa del hidrógeno ninguna de estas cosas era plausible. En cuanto al numerador, no había razón alguna para pensar que existieran medios electrones. En cuanto al denominador, se podría duplicar la masa uniendo dos átomos de hidrógeno para formar una molécula de este elemento, pero era difícil comprender cómo una molécula de hidrógeno podría sobrevivir a la violencia de una transmutación radiactiva sin partirse en átomos separados. También se podría separar un átomo de helio en dos, pero medios átomos eran difícilmente más verosímiles que medios electrones.

Todo aquel que hace alguna transacción sabe que dos cuartos son tanto como un medio. Una partícula alfa que tuviera dos veces la carga de un ion

de hidrógeno y cuatro veces su masa, presentaría la razón de carga a masa apropiada. Podría tratarse de un átomo de helio que se hubiese ionizado perdiendo dos electrones, y esto constituyó, por supuesto, una hipótesis completamente razonable.

Con todo, el verse forzado a hacer conjeturas parece haber atormentado a Rutherford. Ya poseía la mitad de la información que le permitiría estar seguro, puesto que conocía la carga total que las partículas alfa transportaban desde un gramo de radio. Todo lo que le hacía falta era un modo de contar dichas partículas a medida que eran emitidas.

Tres años antes de esto, Crookes había estado trabajando en una pantalla recubierta con sulfuro de cinc fluorescente que, como Giesel había descubierto, resplandecía bajo el impacto de los rayos alfa; esta pantalla podía adquirirse, ya preparada, en *Buchler und Compagnie*. Por un mal movimiento de su mano, Crookes había contaminado su pantalla con una manchita de nitrato de radio, y al ponerla bajo el microscopio para localizar al intruso, había quedado fascinado al descubrir que la luz no estaba distribuida en un resplandor uniforme sobre la pantalla, sino que surgía en una rápida serie de destellos separados, diminutos y brillantes. Una vez que lo hubo observado, un poco de experimentación le permitió poner el espectáculo bajo su control. El radio no necesitaba estar sobre la pantalla, sino sólo cerca de ella, y una buena lupa era suficiente para mostrar los destellos o centelleos separados.

En 1906 Rutherford conocía bien este efecto. Él y sus alumnos de McGill lo habían usado constantemente para detectar partículas alfa y para conocer qué distancia recorrerían. No había duda de que cada destello separado señalaba la llegada de una

sola partícula, pero no había ninguna garantía de que cada partícula que alcanzara la pantalla hiciera saltar su correspondiente destello luminoso. Nadie sabía realmente cómo se producía esta luz, ni si el sulfuro de cinc era sensible en todos sus puntos o solo en algunos particulares.

Lo que Rutherford sí sabía era que un electrómetro sensible tendría que manifestar una desviación perceptible de su aguja si se lo cargaba con todos los iones que podía producir una única partícula alfa. Así fue como volvió a los dispositivos para la recolección de iones, pero el margen entre lo que debería de haber ocurrido y lo que sucedió en la realidad era demasiado poco estrecho. Simplemente, el electrómetro no era enteramente confiable.

De todos modos, los primeros meses de 1907 trajeron consigo una interrupción. En la Universidad de Manchester, en Inglaterra, el profesor Arthur Schuster estaba ansioso por retirarse, y también lo estaba bastante por traer a Rutherford como su sucesor. Rutherford había progresado en McGill. Tenía una posición segura, y desde un comienzo había gozado de tiempo y dinero en abundancia para su investigación. Sin embargo, McGill era un lugar remoto. El centro científico del mundo aún se encontraba en Europa, y en toda la América del Norte la investigación en el campo de la física constituía un lujo, que aun las universidades económicamente poderosas difícilmente podían mantener. Para estar más cerca de la entraña de las cosas Rutherford decidió trasladarse, y a mediados de mayo, concluido el año lectivo, se embarcó desde Quebec para su nuevo puesto en Inglaterra.

En Manchester encontró, ya establecido, a un joven alemán llamado Hans Geiger, que acababa de obtener su título de doctor en la Universidad de

Erlangen y estaba en posesión de la Beca John Harling para la Física. Esto significaba que no tenía que ser ni maestro ni estudiante; su única tarea en la universidad era investigar. Rutherford siempre tenía proyectos, y pronto estuvo Geiger trabajando en el desarrollo del método basado en la ionización, con el fin de convertirlo en un sistema práctico para contar partículas alfa.

Esto resultó ser simplemente una cuestión de inventiva, lo cual no significaba que fuera fácil, sino solo que la base del sistema ya era conocida. Se remontaba a un descubrimiento de John S. Townsend, un antiguo amigo de Rutherford en Cambridge, y a los días en que Rutherford era un recién llegado a Montreal. Precisamente antes de esto, cuando trabajaban juntos en la ionización producida por los rayos X, Thomson y Rutherford habían hallado que era bastante fácil recolectar todos los iones del espacio comprendido entre dos placas, con tanta rapidez como la requerida por los rayos X para producirlos. Una vez alcanzada esta condición, ningún incremento en la tensión entre las placas colectoras aumentaba la llegada de iones, y entonces se decía que la corriente de iones estaba 'saturada'. Fue entonces cuando Townsend descubrió que un gran aumento en la tensión de recolección podía hacer que la llegada de iones superara en mucho la cantidad de saturación.

Esto era lo que sucedía: En condiciones normales, al recorrer un ion el trayecto desde el punto en que había sido producido hasta la placa colectora, chocaría una gran cantidad de veces contra las moléculas neutras del aire, pero, por moverse siempre con tanta lentitud, simplemente se desviaría y proseguiría su camino. En cambio, a las tensiones de Townsend, el campo eléctrico que hacía mover los

iones era suficientemente intenso como para acelerarlos entre colisión y colisión; de este modo, cada tanto, la sacudida que un ion producía al chocar contra una molécula bastaba para expulsar un electrón de la misma. Con esto se agregaba un nuevo par de iones al conjunto originario, y como estos iones también podían ionizar las moléculas contra las cuales se estrellaban, era sumamente fácil incrementar la ionización en centenares o aun en miles de veces.

(Aquí se puede ver, de paso, por qué resultaba de utilidad cuando Rutherford colocaba próximas entre sí las placas que producían el campo eléctrico, en los experimentos sobre la razón de carga a masa de las partículas alfa. En un buen vacío, quedarían bastante pocas moléculas de gas en el estrecho espacio entre las placas. Un ion que acertara a encontrarse allí podría generalmente cruzar de una placa a la otra sin chocar con ninguna molécula, y por lo tanto no tendría ninguna posibilidad de aumentar el número de sus acompañantes de un modo suficiente como para producir una chispa.)

Tomando prestados algunos pormenores de Townsend —o, más bien, de un joven matemático, llamado P. J. Kirkby, que había trabajado bajo sus órdenes—, Rutherford y Geiger tomaron un largo y angosto tubo de bronce, taponaron sus extremos con tapones de ebonita y tendieron un delgado alambre de uno a otro extremo, a lo largo del eje del tubo (fig. 20). Un orificio a través de uno de los tapones, cubierto con una delgada lámina de mica, dejaba pasar las partículas alfa al interior del tubo: una batería de acumuladores de 1.400 voltios cargaba positivamente el alambre y negativamente el propio tubo. En estas condiciones, como Kirkby había puesto en evidencia, solo los electrones libres,

que se dirigían por el interior del tubo hacia el alambre, podrían recoger suficiente energía como para producir ionización cuando entraban en colisión. Los iones positivos serían arrastrados lenta e inocuamente hacia afuera, en tanto que una nube de electrones en constante crecimiento se precipitaría, al unísono, hacia el centro. Cuando repentinamente los electrones alcanzaran el alambre, la carga de éste se redu-

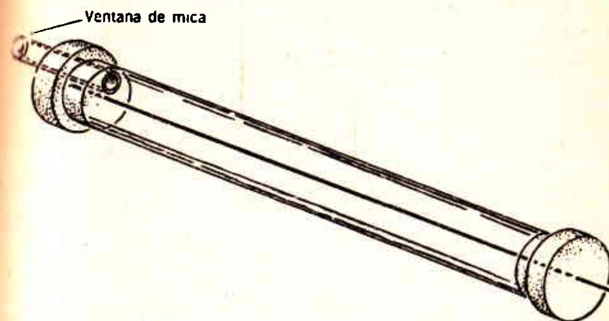


FIG. 20. *El exitoso tubo contador.* Las partículas alfa penetraban en el tubo de bronce a través de la ventana de mica. El propio tubo estaba cargado negativamente. El alambre tendido a lo largo de su eje, desde un extremo al otro, estaba cargado positivamente y tenía conectado un electrómetro. Este era el modelo originario del hoy familiar contador Geiger.

ciría en forma abrupta, y un electrómetro conectado con él pondría en evidencia esta reducción por medio de una oscilación de su aguja; la batería volvería a cargar el alambre por medio de una descarga lenta: y el tubo estaría listo para la partícula alfa siguiente.

El primer tubo construido de acuerdo con esta descripción 'contaba' exitosamente cuando se dejaba entrar las partículas alfa en su interior, y casi del mismo modo cuando se las dejaba afuera. El defecto parecía radicar en una 'radiactividad natural' del

tubo, lo que se subsanó con mucha sencillez construyendo los siguientes más cortos y angostos, y reduciendo, de este modo, la cantidad de metal que pudiera sumar sus partículas alfa a las que llegaban del exterior.

Cuando obtuvieron una forma de contador digna de confianza, Rutherford y Geiger comenzaron a realizar conteos *, progresando lentamente debido a que la sensibilidad del electrómetro que usaban hacía que fuera de respuesta lenta, y no pudieron detectar más de cinco partículas alfa por minuto. Se necesitaba muy poca cantidad de radio C para mantener el tubo contador en funcionamiento, pero esto no tenía importancia ya que les era posible comparar sus rayos gamma con los provenientes de una muestra de peso conocido de bromuro de radio, cada vez que quisieran hacer una estimación de su cantidad.

Una vez que acabaron, pudieron decir con considerable seguridad que un gramo de radio puro emitía $3,4 \times 10^{10}$ partículas alfa por segundo. Dos años antes, en Montreal, Rutherford había pensado en el doble de esta cantidad, pero en aquel entonces creía que cada partícula alfa transportaba la carga de un único electrón.

El conteo había ido tan bien que Rutherford pensó que valdría la pena medir nuevamente la corriente de partículas alfa, y, una vez que obtuvo la cifra correspondiente, la simple división del número de tales partículas por la carga total que transportaban le proporcionó la carga de cada una de ellas. Resultó ser de $9,3 \times 10^{-10}$ 'unidades electrostáticas'.

* Conteo *(counting)*: neologismo que se aplica a la realización de mediciones —mediante las técnicas apropiadas (con contadores, etc.)— para determinar el número de partículas emitidas por una sustancia radiactiva. (N. del T.)

La carga de un electrón (que era sin duda la unidad de carga en el mundo de los átomos) había sido medida varias veces durante los cinco años anteriores. J. J. Thomson había obtenido $3,4 \times 10^{-10}$ (en unidades electrostáticas), y H. A. Wilson, también del Laboratorio Cavendish, $3,1 \times 10^{-10}$. Más recientemente (a mediados de 1908) R. A. Millikan y Louis Begeman, de la Universidad de Chicago, habían presentado una cifra de $4,06 \times 10^{-10}$. Era posible (aunque no verosímil) que una partícula alfa transportara solo la carga de un electrón; era plausible (y muy verosímil) que transportara la de dos, pero razonablemente no podían ser más. Las cifras de Rutherford y Geiger hacían necesario admitir la carga doble de cada partícula alfa, y así fijarla definitivamente como un átomo de helio. También hicieron necesario elevar la carga del electrón a $4,65 \times 10^{-10}$ unidades electrostáticas, lo que en términos modernos serían $1,55 \times 10^{-19}$ culombios.

El haber establecido la carga del electrón y el número de partículas alfa emitidas por un gramo de radio, otorgó una nueva precisión a todo tipo de cálculos interesantes, de los cuales solo necesitamos destacar uno. Rutherford y Geiger podían decir ahora, en forma bastante definitiva, que el semiperíodo del radio era de 1.760 años.

Sin embargo, éste no es del todo el fin de la historia. En el verano de 1908, cuando Rutherford y Geiger habían terminado, resultaba evidente, para cualquiera que siguiese sus argumentos, que las partículas alfa eran átomos de helio. Tres meses después, aunque la cuestión estaba aclarada, Rutherford aprovechó una oportunidad para hacer esto evidente a cualquiera que fuese.

En ese entonces Rutherford poseía casi un tercio

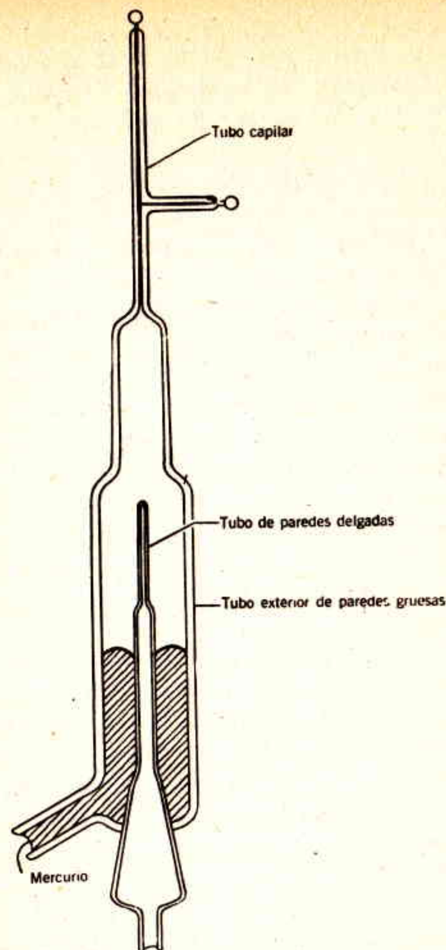


FIG. 21. *Aparato para el experimento con el espectro.* La 'emanación' se bombeaba hacia el tubo interior de paredes delgadas. Las partículas alfa emitidas por la 'emanación' atravesaban las paredes del tubo pequeño, hacia el tubo exterior de paredes gruesas, desde el cual el mercurio las forzaba hacia el tubo capilar de descarga situado en el extremo superior. El capilar estaba provisto de electrodos para alta tensión, y en él se producía el espectro.

de gramo de radio, que le había sido prestado por la Academia de Ciencias de Viena, que había estado trabajando en gran escala sobre los residuos de la refinería de uranio de Joachimsthal. Rutherford tenía un alumno llamado Thomas Royds, que había sido adiestrado en espectroscopía por Schuster. Él también había aprendido suficientemente, acerca del radio a la vez que del espectroscopio, como para que existiera la seguridad de que el experimento habría de resultar.

Rutherford y Royds recogieron la emanación proveniente de una considerable cantidad del radio que aquél conservaba en solución. Inyectaron esa emanación en un tubo fino de paredes de vidrio muy delgadas (fig. 21), cuya construcción le había costado muchos dolores de cabeza al soplador de vidrio del laboratorio, Mister Baumbach. Como lo mostró una pantalla de centelleo, las partículas alfa surgían perfectamente a través del vidrio. Entonces Rutherford y Royds encerraron el tubo con emanación dentro de otro mayor y de vidrio grueso; en el espacio intermedio lograron, por bombeo, un vacío considerablemente alto, y, después de unas pocas horas, inundaron dicho espacio con mercurio, para bombear las partículas alfa acumuladas hacia un tubo de descarga situado en el extremo superior.

No había ningún indicio de helio en el espectro, y tampoco apareció ninguno hasta que hubieron pasado dos días. Entonces se presentó el primer vestigio de la línea amarilla, y dos días después se le unió la verde, pero el espectro completo tardó cerca de una semana en aparecer. Pese a toda su lentitud,

el helio surgía sin embargo, a través del vidrio, en forma de partículas alfa, puesto que cuando Rutherford y Royds extrajeron la emanación y, en su lugar, llenaron con helio el tubo de paredes delgadas, no apareció ningún rastro de dicho elemento en el tubo en que se obtenía el espectro, ni siquiera después de ocho días.

En cuanto a la demora, las partículas alfa que alcanzaban la pared de vidrio exterior del aparato deberían penetrar en ella del mismo modo que lo habían hecho al atravesar el vidrio del tubo interior. Una vez llegadas las partículas al estado de reposo, se encontrarían profundamente metidas en el vidrio grueso, y no habría que soprenderse si necesitaban un cierto tiempo para abrirse camino de regreso. Si esto era así, entonces una delgada barrera de plomo las detendría antes, y las devolvería con más rapidez desde la trampa menos profunda que constituiría. Rutherford y Royds realizaron el experimento nuevamente, con una hoja de plomo envuelta alrededor del tubo con emanación, y esta vez la línea amarilla y la verde aparecieron después de un día, y la totalidad del espectro después de dos.

Luego, como demostración final, volvieron a realizar nuevamente la experiencia con trozos de plomo 'limpio', y después de unas pocas horas fundieron el plomo en el vacío para ver qué gases habría de liberar. En cuatro horas una envoltura de plomo recogía suficiente helio como para dejar vislumbrar la línea amarilla, y en veinticuatro horas la amarilla y la verde resaltaban intensamente. Otro trozo de la misma hoja de plomo, que no había estado cerca del tubo con emanación, no mostraba en absoluto indicios de helio.

Este era un experimento tan emocionante como lo había sido el de Ramsay y Soddy. En realidad

era el remate de aquel experimento anterior, puesto que ponía vívidamente en claro el origen del helio en el cual se transmutaba el radio. Apenas concluida esta experiencia, llegó de Estocolmo la noticia de que los trabajos de Rutherford sobre las transmutaciones lo habían hecho acreedor al Premio Nobel de Química de 1908.

Capítulo 13

Dispersión de las partículas alfa

La ciencia de la radiactividad, tal como la hemos conocido hasta aquí, no estaba en modo alguno acabada de desarrollar en 1908. Aún había problemas relacionados con las diferentes series de transmutaciones, con la producción de calor, con la distancia que recorrería una partícula alfa antes de haber gastado su energía en producir ionización. Será de provecho para nosotros, sin embargo, desviarnos hacia el tema de la dispersión (o difusión) de las partículas alfa, que mantuvo ocupado a Hans Geiger, a intervalos, entre los años 1908 y 1912.

Se trataba de un efecto casi insignificante, que Rutherford había notado por primera vez cuando estaba midiendo la razón de carga a masa de las partículas alfa mediante placas fotográficas, en la Universidad de McGill. A menos que tuviera un alto vacío en el aparato, nunca se observaba una línea definida en el lugar en que las partículas alfa incidían sobre la placa, sino solo un trazo borroso. Incluso con un vacío satisfactorio, la misma borrosidad se manifestaba cuando Rutherford colocaba un trozo de mica sobre una pantalla con una ranura,

que delimitaba el haz de partículas alfa que se habría de registrar. Parecía que cuando las partículas alfa pasaban cerca (o quizás a través) de los átomos del aire o de la mica, a lo largo de su recorrido, se desviaban un poco de la trayectoria que habían estado siguiendo. No era una desviación muy grande, no más de una fracción de grado de inclinación, pero si se piensa, como Rutherford lo hiciera, en la enorme cantidad de movimiento de una partícula alfa viajera y en el pequeñísimo diámetro de un átomo, resultará difícil comprender cómo es que algo pueda llevarse a cabo en tan breve lapso o en tan pequeña distancia sin que en el interior del átomo haya un campo eléctrico de una intensidad totalmente increíble.

Esta 'dispersión' de las partículas alfa prometía aportar alguna información acerca del interior de los átomos. El problema radicaba en imaginar un artificio que permitiera estudiarla, en idear un experimento para descubrir en qué direcciones se dirigían las partículas alfa, y cuántas en cada dirección, cuando atravesaban un determinado espesor de aire o de mica.

Cuando Rutherford emprendió con Geiger el conteo de partículas alfa, lo hizo a conciencia. Necesitaba la mejor información que estuviera en condiciones de obtener, y no podía permitirse incursionar en métodos que pudieran no ser de confianza. Tales exigencias no fueron un obstáculo para un joven físico llamado Erich Regener, de la Universidad de Berlín. Cuando el profesor Heinrich Rubens sugirió que Regener estudiase los centelleos producidos por las partículas alfa, éste estaba muy deseoso de enfrentarse con ellos y de determinar en qué medida la pantalla de sulfuro de cinc era un detector digno de confianza. Poseía un fino sen-

tido en lo referente a todo tipo de aparatos, y estableció una disposición admirable, cuidadosamente planeada en todos sus detalles. Las partículas alfa provenían de una pequeña cantidad de polonio depositado sobre una tira de cobre, e incidían sobre una capa de sulfuro de cinc aplicada en la parte anterior de una placa de vidrio. Regener observaba los destellos luminosos con un microscopio enfocado a través de la parte posterior del vidrio. Una y otra vez procedió a contarlos, en tanto no se resintiera su atención, y finalmente llegó a la conclusión de que su trocito de polonio debía estar emitiendo 1.800 partículas alfa por segundo. Luego, partiendo esta vez de la corriente de ionización que producían (y admitiendo que cada partícula alfa transportaba el doble de la carga de un electrón), obtuvo un segundo resultado, de 2.000 partículas alfa por segundo, que concordaba con el anterior en forma muy razonable.

Esto sucedía en los primeros meses de 1908, cuando los tubos contadores de Rutherford y Geiger ya habían sido destinados a trabajos delicados. En cuanto oyeron acerca del éxito de Regener, Rutherford y Geiger hicieron una pantalla de centelleo para sí mismos, y, al confrontar sus destellos con las oscilaciones de la aguja del electrómetro, obtuvieron los mismos resultados mediante ambos métodos.

La pantalla de centelleo parecía ser exactamente la herramienta que necesitaban para estudiar el efecto dispersor, y, aún mientras se estaban realizando los últimos cálculos importantes, Geiger llevó a cabo una experiencia para ver qué dispersión podría evidenciar la pantalla. Geiger tenía un delgado tubo de vidrio de forma cónica y con una ventana de mica fijada en forma hermética en uno de sus extremos; este tubo podía ser llenado con emanación de radio, para obtener las partículas alfa, y se lo montaba en uno de los extremos de un largo tubo

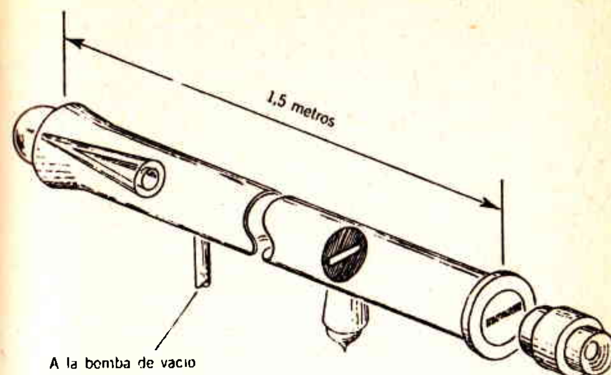


Fig. 22. *El aparato de Geiger para estudiar la dispersión.* El tubo de vidrio de forma cónica, colocado en el extremo izquierdo, se llenaba con 'emanación' de radio y estaba cerrado herméticamente con una ventana de mica. En el tubo de un metro y medio de largo se había hecho el vacío. Las partículas alfa provenientes de la 'emanación' de radio se desplazaban hacia el extremo inferior del tubo, a través de la ranura de la placa de metal, dirigiéndose hacia una pantalla de centelleo, de vidrio cubierto con sulfuro de cinc, situada en el extremo de la derecha. Las partículas alfa producían una franja de luz, nítida y angosta, sobre la pantalla; pero cuando sobre la ranura se colocaba una lámina de oro, la franja se volvía borrosa. Por medio de un microscopio situado detrás de la pantalla de centelleo, Geiger podía contar los destellos por minuto y medir la dispersión.

de vidrio en el cual Geiger obtenía, por bombeo, un vacío lo más elevado posible. Bastante después de la mitad del tubo se encontraba una placa de metal con una ranura, y en el extremo más alejado la pantalla de centelleo, de vidrio cubierto con sul-

furo de cinc. En ella, cuando el tubo cónico se llenaba con emanación, aparecía una franja de luz, angosta, nítida y de bordes definidos: la silueta 'en negativo' de la abertura (ranura) de la placa metálica. Si entonces Geiger abría el tubo, colocaba una hoja de oro sobre la ranura, y volvía a hacer el vacío, la franja de luz se volvía borrosa al dispersar la lámina de oro las partículas alfa, desviándolas de las rectas correspondientes a sus trayectorias. Detrás de la pantalla de centelleo había un microscopio, enfocado sobre una pequeña porción de la misma, y montado de modo de poder deslizarse hacia arriba y hacia abajo, a lo largo de una escala milimetrada. Observando a través del microscopio, Geiger podía contar el número de destellos por minuto que se producían en el centro, o cerca de él, o más alejados, y así obtener una descripción bastante precisa de cómo se desarrollaba la dispersión (fig. 22).

Los gráficos que construyó para representar sus resultados mostraron muy claramente que la dispersión era real. Aunque pocas de las partículas eran dispersadas tanto como medio grado, en la hoja de oro, las dos terceras partes de ellas lo eran hacia un lado o hacia el otro, fuera de la silueta rectangular de la ranura (fig. 23).

Algo de seis meses después, en los comienzos de 1909, Rutherford pidió a Geiger que tomara a un estudiante aún sin graduar, llamado Ernest Marsden, y lo orientara en la iniciación de algún trabajo de investigación. (Rutherford cuidaba mucho de sus 'muchachos', y ellos le retribuían llamándolo 'Papá'.) Marsden ya había trabajado para Geiger el verano anterior, pero esta vez se trataría de una empresa a su cargo: ver si había alguna 'reflexión difusa' de partículas alfa sobre la superficie de una

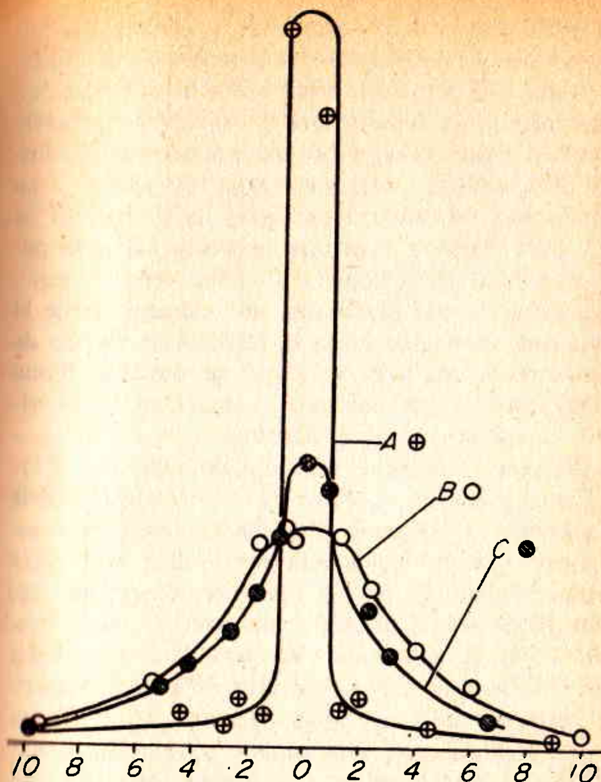


FIG. 23. *Dispersión de las partículas alfa.* Las experiencias realizadas con el aparato de la figura 22 proporcionaron estas curvas. La escala horizontal representa la distancia (en milímetros) de las partículas con respecto al centro de la franja luminosa, sobre la pantalla de centelleo. Las alturas verticales indican el número de partículas alfa dispersadas por minuto. La curva *A* (circulitos marcados con una cruz) muestra el comportamiento de las partículas cuando no se había colocado ninguna lámina sobre la ranura hecha en la placa de metal. La curva *B* (circulitos blancos) muestra la dispersión con dos hojas de oro colocadas sobre la ranura, y la curva C (circulitos negros) muestra la producida con una hoja de oro.

lámina de metal. Era muy poco probable que hubiera alguna, considerando lo reducido de la dispersión que Geiger había observado hasta entonces; esto era una garantía de que el trabajo sería breve. Marsden emplazó un tubo con emanación, lo dirigió oblicuamente hacia una hoja de metal, y en ángulo con ésta colocó una pantalla de sulfuro de cinc para registrar cualquier partícula alfa que pudiese rebotar. Un bloque de plomo, en el medio, capturaba las que se dirigían directamente desde el tubo con emanación hacia la pantalla de sulfuro de cinc. Luego, Marsden y Geiger se sentaron frente al microscopio, en una pieza sumida en la oscuridad, y entonces —cosa increíble para sus ojos,— aparecieron, a pesar de todo, los destellos (fig. 24).

Esto hacía que el proyecto fuera bastante más interesante, y Geiger y Marsden comenzaron a investigar. Las partículas alfa retrocedían al rebotar contra láminas de plomo y de oro, de platino, estaño, plata, cobre, hierro, y aluminio, y cuanto mayor era el peso atómico del metal con que estaba hecha la lámina, tanto más elevado era el número de partículas que rebotaban. Hicieron la prueba de apilar hojas de oro, una delante de la otra, y hallaron que para la primera media docena el número de partículas alfa dispersadas crecía directamente con el espesor. Esto ponía claramente en evidencia que no se trataba de un efecto de superficie, sino que las partículas penetraban y eran dispersadas en el interior de la estructura del metal. Finalmente realizaron un conteo del número real de partículas dispersadas, a partir del cual hicieron la estimación de que alrededor de una partícula alfa por cada ocho mil de las que actuaban sobre la lámina, era dispersada hacia atrás, en dirección a la pantalla de centelleo.

Así fue que en el verano de 1909, cuando Ernest Marsden se graduó en la Universidad de Manchester con el grado de *Bachelor of Science* y distinción de primera categoría en física, se encontró a sí mis-

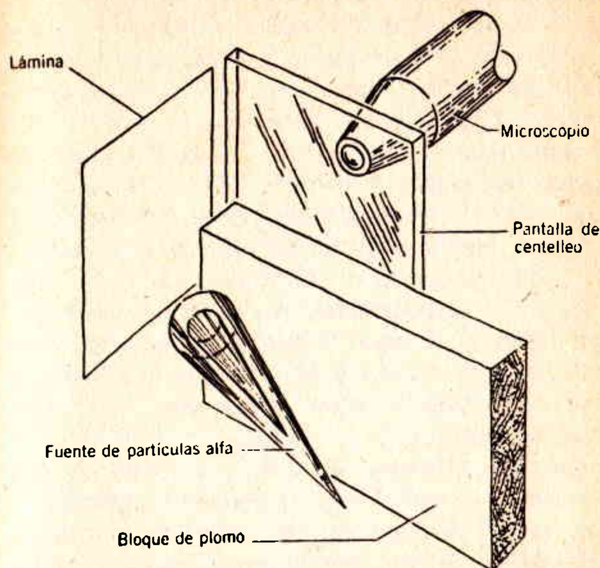


FIG. 24. *El experimento de Geiger-Marsden para investigar la 'reflexión difusa', o retroceso por rebote, de las partículas alfa sobre una lámina.* El tubo de forma cónica emitía las partículas hacia la lámina según un cierto ángulo. El bloque de plomo servía de blindaje, a la pantalla de centelleo, contra las partículas alfa provenientes directamente del tubo. Por medio del microscopio, los experimentadores podían observar si la lámina 'reflejaba' efectivamente las partículas hacia la pantalla.

mo también como joven autor de una comunicación leída ante la *Royal Society*.

Transcurrió otro medio año, y en febrero de 1910 Geiger presentó una comunicación propia, en la

que describía una larga serie de experimentos sobre las partículas alfa dispersadas al atravesar directamente una lámina de metal. Era un trabajo detallado y cuidadoso, y parecía decir lo siguiente acerca de las partículas alfa: Al abrirse paso una de ellas a través del metal, pasaría cerca (o a través) de muchos átomos, y cada átomo que encontrara la desviaría un poco. Serían completamente accidentales tanto la dirección hacia la cual se apartase, como la medida en que se desviase. Habría desviaciones grandes y pequeñas, orientadas al azar hacia arriba, hacia abajo, y en dirección oblicua. En el caso del oro, dos centésimos de grado para una sola desviación constituía un valor medio satisfactorio y representativo. Los argumentos matemáticos que se dedujeron de estas suposiciones concordaron en forma excelente con todos los datos que Geiger había reunido. La única discrepancia estribaba en el experimento de Marsden.

Que una partícula de cada ocho mil que incidían sobre la lámina fuera dispersada según un ángulo recto, parece una proporción suficientemente pequeña. Pero las nuevas mediciones de Geiger mostraban que el número correcto tenía que ser aún mucho más pequeño, pues resultaba simplemente increíble que una racha de suerte diese lugar a cuatro mil quinientas desviaciones separadas, cada una de dos centésimos de grado, una a continuación de la otra y en el mismo sentido, de modo que sumadas constituyeran un giro de un ángulo recto. Con todo las observaciones de Marsden eran acertadas, como también lo eran las de Geiger, hubiera o no algún modo de conciliarlas.

Así quedaron las cosas entre febrero y diciembre; había gran cantidad de otras promisorias investigaciones como para mantener ocupada a la gente.

Después Rutherford comenzó a figurarse cómo se podrían explicar las cosas, y pronto comenzó a proclamar alegremente, a cuantos encontraba, que ahora sabía cómo era un átomo.

La idea clave era la siguiente: La partícula alfa hallaba la lámina literalmente vacía. No era probable que se acercara a algo suficientemente firme como para que la apartara de su trayectoria, y era muy improbable que esto sucediera más de una vez en láminas delgadas. Cada una de las desviaciones de ángulo pronunciado que Marsden había observado se debía a un solo encontronazo entre una partícula alfa y algún tipo de centro de dispersión de los átomos de la lámina de metal.

Cuando Rutherford pasó a imaginar qué tipo de fuerza podría ejercer un átomo, la más plausible resultó la eléctrica. La desviación abrupta de una partícula alfa requeriría una fuerza eléctrica enorme, y probablemente esto significara que la partícula se acercaba mucho al centro de dispersión cuando se desviaba pronunciadamente.

Supongamos, para ser pertinentes, que una partícula alfa emitida por el radio C fuera disparada con su velocidad correspondiente de $2{,}09 \times 10^{9}$ centímetros por segundo, directamente hacia el centro de dispersión de un átomo de oro. Supongamos que dicho centro tuviera una carga positiva correspondiente a cien electrones, y que, además, pudiera usarse la Ley de Coulomb para calcular la repulsión eléctrica producida entre la partícula alfa y el centro de dispersión. Entonces era fácil descubrir que ésta no sería detenida hasta haberse acercado a sólo $3{,}4 \times 10^{-12}$ centímetros del centro de dispersión. El radio de un átomo alojado en un cristal o entrechocándose con otros átomos en un gas podía calcularse en algo así como 10^{-8} centímetros. En el punto

en que finalmente la partícula alfa retrocedía, los bordes del átomo estaban 3.000 veces más alejados que el centro de dispersión.

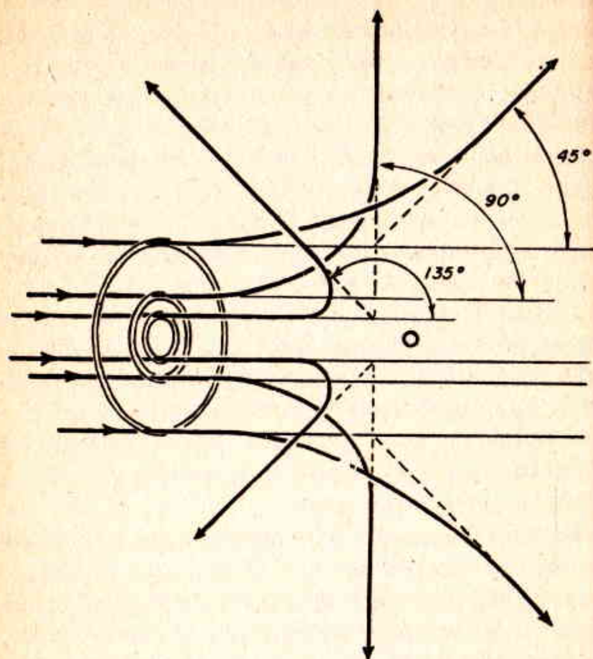


Fig. 25. *Dispersión de las partículas alfa.* El ángulo de dispersión depende de lo cerca que la partícula habría pasado del centro de dispersión (círculo pequeño), cargado positivamente, si ella no hubiera sido desviada hacia un costado. Los grandes anillos concéntricos de la izquierda ilustran acerca de la influencia de la dispersión. Las partículas que llegan siguiendo una línea que pasa por el anillo exterior se dispersan según un ángulo de 45 grados. (En realidad no alcanzarían el blanco.) Las partículas que siguen la línea que pasa por el anillo siguiente, hacia el centro, se dispersan 90 grados, y las que siguen la línea que pasa por el anillo central, 135 grados.

Si los centros de dispersión eran tan pequeños, no había que asombrarse si las partículas alfa erraban por completo a la mayoría de ellos, o pasaban a una distancia tal que su movimiento era muy poco afectado. Pero para algo que se aproximara a un impacto directo, un centro de dispersión tal podría desviar drásticamente a una partícula alfa.

La Ley de Coulomb hace depender la fuerza que se ejerce entre dos cuerpos electrizados de la inversa del cuadrado de su separación. En esto se asemeja bastante a la fuerza de la gravedad, aunque las fuerzas eléctricas son mucho más intensas que las gravitacionales y pueden ser tanto de repulsión como de atracción. Sin embargo, una partícula alfa que pasara frente a un centro de dispersión fijo se comportaría en una forma notablemente parecida a un veloz cometa próximo al Sol. Las leyes del movimiento planetario se aplicarían, y le harían seguir una hipérbola. Lo interesante es que la hipérbola descripta por la partícula tendría la misma forma tanto si ella rodeara por detrás a un centro de dispersión cargado negativamente y que ejerciera una fuerza de atracción, como si fuera desviada frente a uno positivo y dotado de una fuerza de repulsión. El ángulo comprendido entre las dos ramas de su órbita —es decir, entre la recta seguida al llegar y la seguida al partir— no dependería de otra cosa que de la 'puntería', de lo cerca que la partícula habría pasado del centro de dispersión si se hubiera mantenido en línea recta (fig. 25).

Cuando Rutherford se dio cuenta de esto, comenzó a vislumbrar cómo podía inventar un experimento para poner a prueba su modelo del átomo. Podía imaginar los anillos de un blanco dibujados alrededor del centro de dispersión de cada átomo. Si consideraba todos los anillos de un radio particular, éstos

ocuparían una cierta área pequeña de la lámina dispersora. Si calculaba la razón de esta área al área total de la lámina, entonces esta razón también sería la determinada por el número de partículas alfa enfiladas hacia dichos anillos del blanco y el número total de partículas incidentes sobre la lámina. Como aquéllas enfilaban todas hacia puntos situados a la misma distancia del centro de dispersión, todas se desviarían en sus órbitas según el mismo ángulo. De este modo, la razón de las áreas también sería la razón del número de partículas alfa dispersadas según un ángulo particular al número total disparado hacia la lámina.

Ahora solo era cuestión de detalles, para Rutherford, el desarrollar una fórmula que expresara cómo habría de resultar cualquier experimento sobre dispersión de partículas alfa. El número buscado de éstas dependería del ángulo elegido para recibirlas, del espesor de la lámina dispersora, de la carga poseída por cada uno de sus centros de dispersión, y de la velocidad con que penetraban las partículas alfa. La fórmula cubría todas estas posibilidades.

En febrero de 1911 estaba lista, y Rutherford pidió a Geiger que realizara algunos conteos y viera en qué medida el número de partículas alfa dispersadas podría depender del ángulo con que eran recogidas. En marzo, Geiger tenía unas cuantas cifras razonables para el 'Profe' (era demasiado alemán para usar el apodo 'Papá'), y en abril Rutherford ya tenía escritas todas sus ideas, con la descripción del tipo de átomo que dispersaría partículas alfa, y con la explicación acerca de cómo podía deducirse la fórmula de la dispersión. En mayo, casi con la velocidad de un diario, *The Philosophical Magazine* publicó su memoria. . . . y eso fue todo. Geiger y Marsden reanudaron su antigua colaboración y rea-

lizaron una verificación cuidadosa y consciente de cada detalle de la fórmula de la dispersión. Los datos preliminares de Geiger fueron retenidos hasta que estuviera concluido todo el trabajo, Rutherford se volcó a otra tarea, y su modelo del átomo permaneció quieto, y prácticamente sin que nadie reparara en él, en las páginas impresas de una publicación puramente teórica.

Capítulo 14

Algo de radioquímica

Ya es hora de que regresemos al torio, y el torio nos conduce inevitablemente a Otto Hahn. Había comenzado como químico especializado en química orgánica en Marburg, Alemania, y, habiéndosele ofrecido un cargo sólo si aprendía inglés, se apareció por el laboratorio de Ramsay en el otoño de 1904, para combinar el inglés con otras experiencias. Ramsay lo había puesto, en forma bastante arbitraria, a separar el radio de una porción de una sustancia que contenía bario, y que había sido extraída de 250 kilogramos de un nuevo mineral radiactivo proveniente de Ceylán. Esto requería el tipo de química que Hahn menos conocía, pero él pudo dar con las memorias de Giesel y realizó un intento. Encontró el radio bien pronto, y una sustancia aún más activa con un comportamiento casi opuesto, que no cristalizaba con los bromuros sino que se aferraba a la solución madre. El nuevo material emitía una emanación, con un semiperíodo de un minuto, y ésta producía un depósito activo con un semiperíodo de once horas. Estos deberían haber sido los signos del torio, pero éste nunca era tan intensamente radiactivo como la sustancia con

que Hahn estaba trabajando. Debido a las semejanzas y a la llamativa diferencia, Hahn asignó el nombre de radiotorio a lo que él creía con seguridad que tenía que ser una nueva sustancia activa.

Ramsay estaba poderosamente impresionado, y rápidamente persuadió al profesor Emil Fischer, de la Universidad de Berlín, para que contratara a Hahn como experto en radiactividad para el instituto de investigación que allí tenía. Esto era un poco demasiado rápido para Hahn, y en el verano de 1905 se embarcó hacia Montreal para recoger un poco de experiencia en su especialidad repentinamente adquirida. Una vez que hubo llegado, pudo convencer a Rutherford de que el radiotorio era real y que, más bien que el torio, era el predecesor del torio X. Luego continuó trabajando durante un año en varios problemas físicos y químicos relacionados con el torio y el actinio, y finalmente partió hacia su puesto en Berlín.

El radiotorio era real. Sus rayos alfa demostraban este hecho, así como el modo en que daría origen al torio X; pero como elemento químico comenzó pronto a ocasionar dificultades. Descendía del torio, lo cual tanto Boltwood como McCoy habían puesto en claro mostrando que la radiactividad total de los minerales de torio era estrictamente proporcional al torio que éstos contenían. (McCoy trabajaba ahora con un estudiante-graduado de Nueva Escocia, llamado W. H. Ross.) En Berlín, Hahn inició una colaboración con la firma Knöfler —fabricante de productos químicos, a la que Rutherford y Soddy habían comprado su nitrato de torio más puro—, y entonces se topó con un hecho muy extraño. A través de todo el proceso de manufactura, desde el mineral bruto hasta el producto final más refinado, la proporción de radiotorio a torio permanecía constan-

te en todas las muestras que investigó. Por alguna razón extraña, el proceso de Knöfler fallaba en cuanto a separar el radiotorio, aunque éste había sido extraído sin inconveniente en el laboratorio de Ramsay.

Entonces llegó una carta de Boltwood, con la noticia casual de que poseía una preparación de radiotorio que había conservado una radiactividad constante durante un período de dos años. Gracias a sus propias mediciones, Hahn sabía que dos años era aproximadamente el tiempo que el radiotorio empleaba para reducirse a la mitad. Sin duda, la muestra de Boltwood estaba siendo reaprovisionada, y ello significaba que probablemente contuviera un antecesor del radiotorio, de vida más larga que la de éste, que se transmutaba en radiotorio sin emitir rayos. Partiendo de esta idea, estuvo pronto en condiciones de extraer del mineral una sustancia que no era torio y no emitía rayos, pero que, una vez obtenida, comenzó lentamente a desarrollar una actividad alfa y a poner en libertad una pequeña cantidad de la emanación cuyo semiperíodo era de un minuto. Aquélla era evidentemente la sustancia situada entre el torio y el radiotorio, y por ello Hahn sugirió el nombre de mesotorio.

Como Hahn había estado proporcionando todo tipo de ayuda a la planta de Knöfler, y como el mesotorio podría tener un futuro comercial, se cuidó de no decir nada acerca de su química. Sin embargo, Boltwood podía tanto recoger una sugerencia como proporcionarla, y si el radiotorio era bastante parecido al torio, pensó que el mesotorio podría asemejarse al torio X. Para esto, exhumó una vieja muestra de torio X, cuyo semiperíodo de cuatro días hacía ya tiempo que debería haberla conducido a una extinción total. Con todo, emitía una inequívoca emanación, y el torio X que la producía tendría que haberse estado formando a partir de radiotorio, que a su vez provendría de alguna cantidad de mesotorio contenido en la preparación original. Esto hacía parecer, como Boltwood lo destacó, que la porción de bario de Ramsay había contenido mesotorio cuando todavía era reciente, y que el radiotorio que Hahn había extraído de ella con tanta facilidad se había producido allí, probablemente, mientras la muestra esperaba en uno de los estantes de Ramsay.

En el ínterin, McCoy y Ross habían estado trabajando afanosamente para separar el radiotorio del torio. Ensayaron todos los recursos de precipitación y cristalización, repitiendo algunos de sus procedimientos cuarenta y hasta cien veces. Con perfecta regularidad fracasaron en cuanto a obtener algún cambio en la proporción que de radiotorio a torio había en los materiales con que trabajaban. A fines de 1907 se rindieron, finalmente, con el reconocimiento liso y llano: "La separación directa del radiotorio a partir del torio, por procedimientos químicos, es señaladamente difícil, si no imposible".

A la sazón Hahn halló una actividad beta en su mesotorio, y, mediante un uso elaborado de la teoría matemática de las transmutaciones, pudo desentrañar toda la cadena de transformaciones. Haciendo uso de todas las mediciones realizadas hasta entonces por Boltwood, por McCoy y Ross, por G. A. Blanc en Roma, y combinándolas con las propias, llegó a una serie del torio que se desarrollaba del siguiente modo: El torio emitía partículas alfa y se transmutaba gradualmente en un primer mesotorio. Éste se transformaba, sin emisión de rayos, en un segundo mesotorio, y poseía un semiperíodo de cinco años y medio. El segundo mesotorio, con un semiperíodo de 6,20 días, emitía partículas beta y

se transmutaba en radiotorio. Este emitía partículas alfa, tenía un semiperíodo de cerca de dos años, y se transformaba en torio X (fig. 26).

Pero ahora, en el verano de 1908, el descubrimiento del ionio había planteado un nuevo enigma acerca del torio. El ionio descendía del uranio y producía radio. No tenía nada que ver con la serie de transmutaciones del torio. Sin embargo, como Boltwood había descubierto al aislarlo, todas las reacciones químicas que actuaban sobre el torio, lo hacían

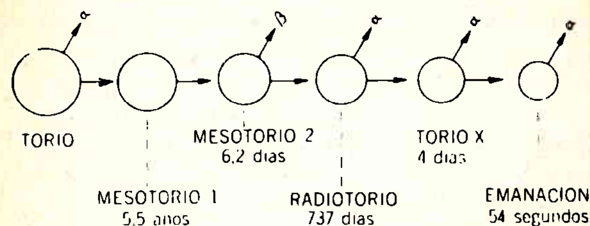


FIG. 26. *La cadena de transmutaciones del torio.*

igualmente bien sobre el ionio. Hahn, en el mismo orden de cosas, lo halló en el más puro de los nitratos de torio de Knöfler, aunque el mineral empleado era notablemente pobre en uranio y difícilmente haya contenido una pizca de ionio. Entonces Keetman, un alumno de Marckwald, respaldó tanto a Boltwood como a Hahn. Para realizar una comprobación química rigurosa, había mezclado deliberadamente ionio con torio, y tratado de separarlos nuevamente, pero no había encontrado ningún recurso químico que pudiera siquiera alterar las proporciones de la mezcla. El ionio era, con las consiguientes molestias, como el torio; y a estas novedades Keetman les agregó un dato extra: que mediante los procedimientos

con que se extraía el ionio de los minerales también se extraía uranio X.

Llegados a este punto se puede comenzar a reparar en una cierta monotonía en el comportamiento químico de estos elementos radiactivos. El torio y el radiotorio al igual que el ionio y el uranio X eran todos notablemente semejantes uno al otro, y el primer mesotorio se parecía al torio X. A esto podemos agregar un par de detalles más. En el laboratorio de Marie Curie en la Sorbona (en el que ella había sucedido a Pierre Curie en su puesto tan trabajosamente logrado), dos intentos separados, hechos por dos químicos llamados Szilard y Herchfinkel, fracasaron en cuanto a separar el radio D del plomo ordinario. Luego en Berlín, en 1910, Marckwald descubrió que era difícil, si no imposible, purificar el radio contaminado con el primer mesotorio de Hahn.

Desde que había dejado el laboratorio de Ramsay, en todo el lapso que va de 1904 a 1910, Soddy había realizado míseros progresos. Sus soluciones de uranio habían fracasado persistentemente en cuanto a producir radio, y cuando, en cambio, hizo el intento de trabajar con uranio X, se encontró con que era un material altamente evasivo. A veces precipitaba y a veces no, y Soddy no pudo establecer nada definido acerca de su comportamiento químico.

Pero en 1910 necesitó una cierta cantidad de mesotorio, y como Knöfler aún no lo había lanzado al mercado, compró una cantidad de torianita y se dio a la tarea de extraer el mesotorio por sí mismo. Recordando lo que Boltwood había dicho, añadió bario a su solución (para reproducir el procedimiento de Ramsay) y recogió el mesotorio junto con un precipitado de sulfato de bario. El mesotorio y el bario demostraron ser, de un modo inesperado, difíciles de separar, y Soddy fue llevado a emplear el antiguo pro-

cedimiento de los Curie, la precipitación fraccionada por medio del alcohol. Ésta dio un resultado satisfactorio; el cloruro de mesotorio cristalizó como Soddy había esperado, pero también hizo lo propio el cloruro de radio, puesto que la torianita empleada contenía una cantidad de radio igual a casi la tercera parte del torio. Esto estaba perfectamente, hasta que Soddy notó que en cada muestra, y a través de cada precipitación, las proporciones de radio y mesotorio permanecían iguales, y con ellos siempre venía torio X.

McCoy, Hahn, o Marckwald, podrían haber tomado esto con calma, pero, después de lo evasivo que se había mostrado su uranio X, semejante comportamiento, manifiesto y definido, anonadó a Soddy. Allí donde otros habían hablado de una química "extremadamente similar" o "muy parecida", Soddy declaró torpemente que, en cuanto a comportamiento químico, el mesotorio 1, el torio X, y el radio, eran "idénticos".

Sabía perfectamente que no tenía derecho a exigir tanto, y se dio de cabeza con la dificultad. Como las partículas alfa eran átomos de helio, cada una de las emitidas durante una transmutación hacía disminuir en cuatro el peso atómico de la sustancia. El torio tenía un peso atómico igual a 232,4, de donde para el mesotorio tendría que ser de 228,4 y para el torio X de 224,4. El radio, de acuerdo con mediciones directas tenía un peso atómico igual a 226,5. Según las reglas de química aceptadas, tres sustancias con tres pesos atómicos diferentes tenían que ser tres elementos químicos diferentes, y difícilmente podrían tener "idéntico" comportamiento químico. Soddy admitió todo esto, pero, con reglas o sin reglas, él había visto lo que había visto, y reforzó su argumento señalando la otra identidad que se presentaba en el caso del torio, el ionio, y el radiotorio, cuyos pesos atómicos eran 232,4, 230,5 y 228,4. Por otra parte, el radioplomo de 210,5 era idéntico al plomo común de 207,1. A la luz de todo esto, se adelantó a sugerir la posibilidad de que tales grupos existieran aun entre los elementos corrientes, presentando las mismas diferencias enteras en los pesos atómicos de sus integrantes, pero ignorados por la humanidad solo debido a que la identidad de comportamiento químico siempre mantenía juntos a los elementos del grupo.

Era una idea fascinante, que lo condujo fuera del laboratorio y hacia la 'literatura', a buscar todo lo que había sido escrito en radioquímica. Durante 1911 Soddy indagó y leyó, y reunió sus hallazgos en un delgado libro marrón, titulado *The Chemistry of the Radio-Elements (La química de los radioelementos).* Valió la pena haberlo hecho, porque de este trabajo libresco extrajo un descubrimiento muy interesante, referente a una propiedad particular de la Tabla Periódica.

Cuando los químicos hablaban de la 'valencia' de un elemento, se referían al número de uniones de que uno de sus átomos podría disponer para asociarse a otros átomos en un compuesto. El oxígeno era bivalente, y cada átomo de oxígeno empleaba dos uniones para ligarse con dos átomos de hidrógeno monovalente en la molécula de agua. El carbono era tetravalente, de modo que un átomo de carbono podía ligarse con cuatro átomos de hidrógeno en la molécula de metano, o con dos átomos de oxígeno (con una doble unión cada uno) en el dióxido de carbono. En la Tabla Periódica, todos los elementos de una columna vertical tenían la misma valencia. En la columna 1 y en la 7 se encontraban los elementos cuya valencia era 1, y la valencia aumentaba en una uni-

0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
He 3,99	Li 6,94	Be 9,1	B 11,0	C 12,00	N 14,0	O 16,00	F 19,0	
Ne 20,2	Na 23,00	Mg 24,32	Al 27,1	Si 28,3	P 31,0	S 32,07	Cl 35,46	
A 39,9	K 39,10 / Cu 63,6	Ca 40,1 / Zn 65,4	Sc 44,1 / Ga 69,9	Ti 48,1 / Ge 72,5	V 51,0 / As 75,0	Cr 52,0 / Se 79,2	Mn 54,9 / Br 79,92	Fe 55,8 Co 59,0 Ni 58,7
Kr 82,9	Rb 85,5 / Ag 107,88	Sr 87,6 / Cd 112,4	Y 89,0 / In 115	Zr 90,6 / Sn 119,0	Nb 94 / Sb 120,2	Mo 96,0 / Te 127,5	? / I 126,9	Ru 101,7 Rh 102,9 Pd 106,7
X 130	Cs 133 / —	Ba 137,4 / —	La 139,0 / Yb 172,0	Ce 140,25 / —	— / Ta 181,5	— / W 184,0	— / —	Os 191 Ir 193,4 Pt 195,2
	Au 197,2 / —	Hg 200,6 / Ra 226	Tl 204,0 / —	Pb 207,1 / Th 232,4	Bi 208,0 / —	— / U 238,5	—	

dad, partiendo de cualquiera de los dos lados, hasta alcanzar el valor cuatro en la columna 4 del centro (fig. 27).

Lo que Soddy notó fue que cada elemento radiactivo cuya química era comprendida poseía una valencia par, de modo que pertenecía a una de las columnas de número par en la Tabla. El trío tetravalente del torio, ionio, y radiotorio, caía en la columna 4 (encabezada por el carbono); el trío bivalente del radio, mesotorio, y torio X, en la columna 2 (encabezada por el berilio). Las emanaciones inertes que no poseían valencia se ubicaban, como miembros de la familia del argón, en la columna 0. El polonio, tal como Marckwald lo había ubicado, estaba debajo del telurio en la columna 6; el plomo en el cual probablemente se transmutaba, en la columna 4.

Toda vez que un átomo emitía una partícula alfa, la transmutación desplazaba al elemento dos lugares hacia la izquierda en la Tabla Periódica, como cuando el torio se transmutaba en mesotorio 1, o el torio X en la emanación. Pero también había movimientos en sentido opuesto, del mesotorio de la columna 2 al radiotorio de la columna 4, por ejemplo, o del radioplomo de la columna 4 hasta el polonio de la columna 6, y luego hacia abajo (presumiblemente), otra vez hasta la columna 4.

Soddy había aprendido todo lo que se conocía, y también sabía dónde el conocimiento químico raleaba. En los primeros meses de 1912, alistó a un joven químico de Glasgow, llamado Alexander Fleck, para

---

FIG. 27. *La Tabla Periódica de 1912.* Sólo difiere de la de 1898 (fig. 1) en el agregado de una columna cero para los gases inertes, en la inclusión del radio en la última fila, y en cambios en algunos pesos atómicos.

que trabajara en llenar los huecos, y al promediar el verano Fleck obtuvo algunos resultados. Como ya Keetman lo había sostenido (aunque Soddy lo había hallado imposible de creer), el uranio X tenía la química del torio, y lo mismo sucedía —como Fleck demostró— con el radioactinio. Además, el torio B tenía la química del plomo.

Capítulo 15

Los elementos radiactivos encuentran su lugar

En 1912, en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, en el oeste de Alemania, había un joven profesor-conferenciante de fisicoquímica llamado Kasimir Fajans. Como Marie Curie, había nacido en Varsovia, en la Polonia rusa, pero en lugar de Francia había elegido a Alemania para seguir sus estudios. Después de doctorarse en Heidelberg se había dirigido a Zürich, para pasar un año dedicado al estudio y a la investigación, y luego al laboratorio de Rutherford en Manchester, para hacer otro tanto. En consecuencia, estaba pletórico de conocimiento sobre la radiactividad, presto para asimilar cuanto Soddy había escrito en su libro, y dotado, por su reciente aprendizaje de la química, de principios que prometían poner en orden todas las cadenas de transmutaciones radiactivas.

Dejando de lado los gases inertes, toda fila completa de la Tabla Periódica comenzaba a la izquierda con un álcali, que era 'electropositivo' puesto que entraba en solución como ion positivo, y terminaba con un halógeno, que lo hacía como ion negativo y por ello era 'electronegativo'. Entre ellos, los ele-

mentos se distribuían en forma gradual de una cualidad extrema a la otra, de modo que siempre se podía decir que un elemento particular era más electronegativo (o 'electroquímicamente más noble') que su vecino de la izquierda. Una comprobación útil de esto se basaba en el efecto por el cual se produce el depósito electrolítico. Como el polonio en solución se depositaba sobre una barra de bismuto, aquél tendría que ser electroquímicamente más noble que éste y por lo tanto tendría que estar a su derecha en la Tabla Periódica.

De algunos de los elementos radiactivos era tanto lo que se conocía sobre su comportamiento químico, por haberlos ya catalogado Soddy, que no había duda en cuanto a qué lugar les correspondía en la Tabla Periódica. De otros elementos radiactivos por lo menos se sabía cuál de los de un par era electroquímicamente más noble. El radio C, por ejemplo, era más noble que el radio B, y el F más noble que el E, el cual a su vez era más noble que el radio D.

Este era el material con el cual Fajans tenía que trabajar, y al reunirlo vio como todas las transmutaciones radiactivas podían ajustarse a dos reglas. Cuando era emitida una partícula beta, el nuevo elemento resultaba electroquímicamente más noble que el viejo, o, como él lo expresara, el producto era más noble que la sustancia madre. (Una buena cantidad de las transmutaciones producidas sin emisión de rayos lo eran, según se había descubierto, con emisión de partículas beta de velocidades considerablemente bajas; así que Fajans también sometió a las restantes a esta regla.) Cuando era emitida una partícula alfa, el elemento originario resultaba ser electroquímicamente más noble que el nuevo (fig. 28).

Usando estas dos reglas, Fajans halló que era posi-

ble ubicar todos los elementos conocidos en la Tabla Periódica (fig. 29), solo que, pensando en el plomo de Soddy, dejó de lado toda preocupación acerca del número de elementos de comportamiento químico idéntico y diferente peso atómico que tenían que ocupar un mismo lugar. Solo en uno o dos casos hizo uso de su imaginación para obviar alguna dificultad.

El uranio X, en la columna 4 (fig. 29), emitía una partícula beta, y por lo tanto tenía que convertirse en un elemento de la columna 5 o de la 6. Boltwood

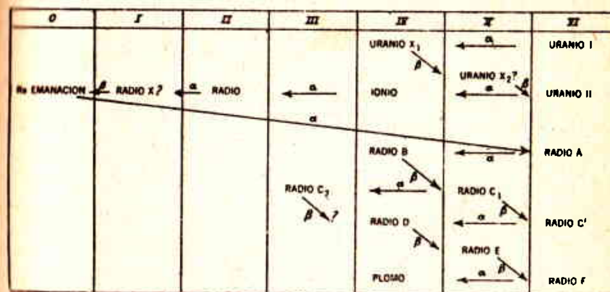


FIG. 28. *La cadena de transmutaciones del uranio y la del radio.*

había descubierto, unos pocos años antes, que el uranio emitía el doble de la cantidad de partículas que debería emitir, de modo que en la columna 6 bien podría haber dos 'uranios' diferentes. El segundo uranio no podría ser, sin embargo, un producto directo del uranio X, puesto que emitía partículas alfa y el producto del uranio X no. Fajans tuvo que suponer, entonces, que el uranio X de Crookes, que ahora él llamaba uranio X_1, se transmutaba en un segundo, uranio X_2, de vida muy larga, el cual emitía partículas beta lentas al transmutarse en el segundo uranio (fig. 28).

0	I	II	III	IV	V	VI
	Au 197,2	Hg 200,6	Tl 204,4 AcD 206,5 ThD 208,4 RaC_2 210,5	Pb 206,5 ThD_2 208,4 RaD 210,5 AcB 210,5 ThB 212,4 RaB 214,5	Bi 208,4 RaE 210,5 AcC 210,5 ThC_1 212,4 RaC_1 214,5	RaF 210,5 ThC_1 212,4 RaC' 214,5 AcA 214,5 ThA 216,4 RaA 218,5
AcEm 218,5 ThEm 220,4 RaEm 222,5	AcX_1 218,5 ThX_2 220,4 RaX 222,5	AcX 222,5 ThX 224,4 Ra 226,5 MsThl 228,4	Ac 226,5 MsTh2 228,4	RaAc 226,5 RaTh 228,4 Io 230,5 Th 232,4 UrX 234,5	UrX_2 234,5	UrII 234,5 UrI 238,5

FIG. 29. *La Tabla Periódica de Fajans.*

El otro problema tenía que ver con las emanaciones. En caso de ser producidas por las transmutaciones del radio y del torio X efectuadas con emisión de partículas alfa, tendrían que ser menos nobles, y esto significaba que serían extremadamente electropositivas. Por el contrario, lo poco que se conocía sobre la química de los elementos de los depósitos activos sugería que ellos eran completamente electronegativos; por ello no podrían haberse formado a partir de una emanación electropositiva por emisión de una partícula alfa. Fajans resolvió esto mediante la invención de un argumento que permitió

FIG. 30. *La cadena de transmutaciones del torio.*

clasificar a las emanaciones como extremadamente electronegativas, y luego inventando elementos intermedios para efectuar la transición. El radio, supuso, emitiría su partícula alfa y se convertiría en radio X, de la columna 1, que sería muy electropositivo. Entonces el radio X emitiría una partícula beta y así produciría la emanación electronegativa. (En la serie del torio, un torio X_2 cumpliría la misma función (fig. 30).)

Al ir los elementos ocupando sus lugares, Fajans vio que podía engrosar sus reglas, y no solo dar el sentido sino también la distancia que un elemento recorría por cada transmutación. La emisión de una par-

tícula alfa lo desplazaba dos lugares hacia atrás (como Soddy ya lo había señalado), y la emisión de una partícula beta, un lugar hacia adelante. Esto concordaba muy acertadamente con la invención del uranio X_2, pero la regla de la partícula alfa fallaba en el caso del torio X_2 y del radio X.

Dos largas memorias le fueron necesarias a Fajans para fundamentar esto, y las mismas aparecieron impresas a mediados de febrero de 1913, precisamente cuando Soddy estaba concluyendo un manuscrito suyo también sobre el mismo tema. La regla de la partícula alfa ya le pertenecía, y las investigaciones químicas de Fleck le habían mostrado el camino hacia la regla para las partículas beta. Soddy y Fleck sabían ahora que el radio B tenía la química del plomo, y que el radio C y el radio E compartían ambos la química del bismuto; esto colocaba a dichos elementos firmemente en el preciso lugar en que Fajans había creído que tenían que estar. Soddy también inventó un uranio X_2 (pero lo llamó eka-tantalio) para ser colocado en la columna 5. Como se atenía a las reacciones químicas más que a la electroquímica, se ahorró la complicación que las emanaciones habían constituido para Fajans. Las reglas de Soddy solo se referían a una caída de dos lugares en la Tabla cuando surgía una partícula alfa, y de este modo el radio, en la columna 2, producía la emanación de la columna 0, y ésta daba lugar al radio A de la columna 6. El radio X y el torio X_2 quedaron excluidos calladamente.

Soddy ya se había burlado de las reglas cuando había sugerido que sustancias con diferentes pesos atómicos y diferentes tipos de comportamiento radiactivo podrían, sin embargo, tener solo una única química, y de este modo ser consideradas químicamente como variedades de un mismo elemento. Ahora iba Soddy a provocar otro sacudimiento, en cuanto al ionio de Boltwood. Había sido motivo de discusión cuál sería su semiperíodo de transmutación, pero ahora que era muy posible que existiera el eka-tantalio, había argumentos para mostrar que podría llegar a tanto como cien mil años. En tal caso, el ionio sería considerablemente más abundante, en los minerales, que el radio.

La dificultad estaba en que el ionio no tenía espectro. Un intento de fotografiarlo había sido realizado en la Universidad de Viena, por Franz Exner (un viejo amigo al cual Röntgen le había enviado su folleto en el que anunciaba el descubrimiento de los rayos X) y Eduard Haschek, dos renombrados especialistas en espectroscopía, que utilizaron una muestra de torio-ionio obtenida, por concentración, a partir de diez toneladas de residuos de Joachimsthal, por el gran químico austríaco Auer von Welsbach. Lo que observaron en el espectro era torio, además de cerio y escandio en menores cantidades, y líneas reconocibles pertenecientes a otros cinco elementos del grupo de las tierras raras, pero ningún indicio de algo que pudiera haber sido ionio. Otro intento fue llevado a cabo en el laboratorio de Rutherford en Manchester, por Roberto Rossi (a quien Schuster había adiestrado en espectroscopía) y A. S. Russell (un ex alumno de Soddy). La muestra de torio-ionio que emplearon había sido extraída por Boltwood, también de los residuos de Joachimsthal, durante una visita invernal a Manchester, y después de una segunda purificación hecha por Russell solo dejó ver el espectro del torio, con un ínfimo rastro de escandio.

Todos concordaban en la interpretación de estos fracasos. En las muestras empleadas había habido mucho menos ionio del esperado, y esto hacía del ionio un elemento transitorio con una vida muy bre-

ve. Pero ahora Soddy reparó en que el espectro del ionio había estado, en realidad, siempre presente. Por más desconcertante que pareciera, dada su diferencia en cuanto a peso atómico, el ionio y el torio tendrían que tener espectros idénticos, del mismo modo que tenían idéntico comportamiento químico.

Sin embargo, de acuerdo con su radiactividad, seguía siendo posible distinguir el torio llamado ionio del torio llamado uranio X, y también estos dos del torio llamado radiotorio. Era conveniente tener un nombre para los grupos de sustancias con una química idéntica —como en este caso—, sustancias que, aunque todas eran un mismo elemento, podían aún ser distinguidas una de otra; por ello, pronto inventó Soddy el nombre 'isótopo', de dos términos griegos que significan 'en igual lugar'. Aquél era notoriamente útil puesto que ahora resultaba mucho más fácil plantear la pregunta que Soddy había hecho anteriormente (aunque por el momento no tenía respuesta): ¿No podrían también los elementos corrientes consistir en grupos de isótopos de diferentes pesos atómicos?

Capítulo 16

El átomo provisto de un núcleo

En la primavera de 1912, cuando el libro de Soddy solo tenía unos pocos meses, un joven visitante danés, llamado Niels Bohr, se había presentado en el laboratorio de Rutherford. Era uno de los hijos del profesor de fisiología de la Universidad de Copenhague, acababa de doctorarse allí en física, y ahora estaba concluyendo un año de estudios en el exterior. Geiger y Marsden aún estaban ocupados en las largas verificaciones de la fórmula de la dispersión, pero Bohr se encontró con que, en Manchester, el modelo del átomo de Rutherford se daba por sentado. Todos sabían, por así decirlo, que el átomo era casi vacío, que alrededor de su borde exterior había electrones que se movían dentro del campo eléctrico de un centro de dispersión muy diminuto y macizo, cargado positivamente; y que este campo eléctrico se reducía hacia el exterior en función del cuadrado de la distancia. Bohr se introdujo fácilmente en la vida del laboratorio, habló, tuvo ideas, hizo sugestiones, escuchó con ambos oídos, escribió un trabajo teórico sobre el pasaje de las partículas alfa a través de la materia, y después de cuatro meses regresó a Copen-

hague. Al llegar a término su visita, el centro de dispersión positivo situado en el corazón del átomo recibió, casualmente, un nombre: 'núcleo'.

Dos meses después, Geiger regresó a Alemania tras haber estado casi seis años en Manchester. Los experimentos sobre la dispersión habían concluido finalmente; en octubre estaba lista la memoria en la que se los describía. Pero después ésta tuvo que esperar, puesto que los trabajos se habían hecho con radio vienés y, como gesto de cortesía hacia la Academia de Ciencias, tenía que publicarse simultáneamente en Viena y en Londres. Por fin, en abril de 1913, el despacioso trámite vienés le permitió aparecer, y para aquel entonces Bohr estaba sumido en la tarea que se había llevado consigo, de regreso a su país.

Rutherford había inventado el átomo provisto de un núcleo solo para explicar la dispersión de las partículas alfa (fig. 31), y esto era algo que lograba de un modo soberbio, como Geiger y Marsden lo habían mostrado ya. Bohr quería darle una utilidad más general, para descubrir de qué modo los electrones eran retenidos en su lugar alrededor del núcleo, y para ver si un átomo construido de esta forma podía ser llevado a poner en claro el origen de los espectros de los diferentes elementos y a explicar su química y su radiactividad.

Desde un comienzo resultó una tarea irrealizable, puesto que no había ninguna manera apropiada de incorporar los electrones. Si Bohr los imaginaba distribuidos en posiciones fijas alrededor del núcleo, no podía haber estabilidad. Si la repulsión que se producía entre todas sus cargas negativas no los proyectaba hacia afuera, la atracción del núcleo positivo tendría que encargarse de precipitarlos hacia adentro. Si los imaginaba girando como los planetas, las

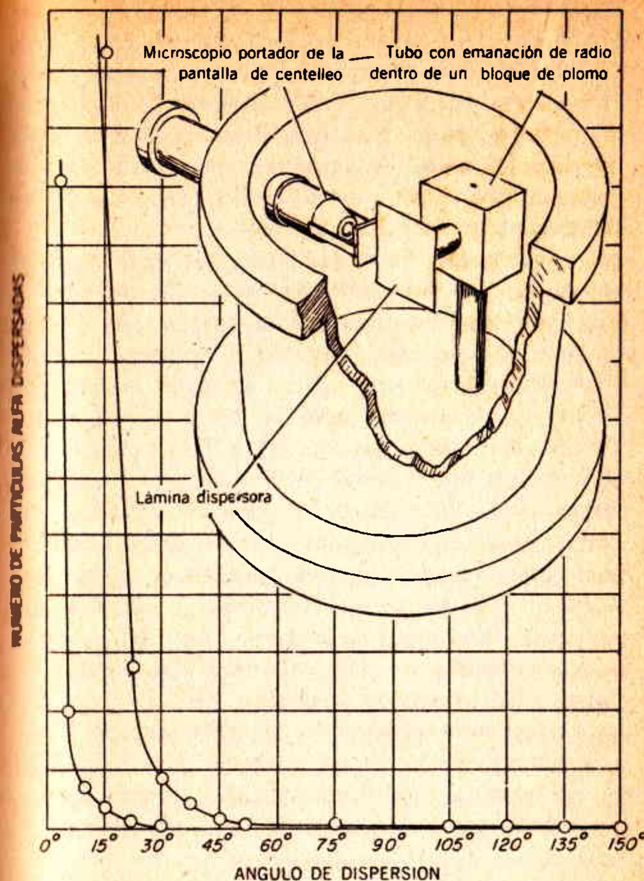


FIG. 31. *Ángulo de dispersión.* En este aparato, el bloque de plomo, que contenía el tubo con la 'emanación' de radio, y la lámina dispersora estaban fijados a la base para mantener constante el ángulo de incidencia. La caja portadora del microscopio y del contador de centelleo podía ser rotada sobre la base para cambiar la dirección de la visual. El gráfico muestra dos curvas de dispersión.

repulsiones (que no aparecen en el sistema solar) seguían estando en juego para complicar la parte matemática. Peor todavía, si un electrón giraba tenía que acelerarse; si un cuerpo cargado se aceleraba, irradiaba su energía en forma de ondas electromagnéticas; si un electrón al girar perdía energía, tendría que precipitarse en espiral hacia el núcleo, y una vez más el átomo se derrumbaría.

De qué modo Bohr resolvió estos problemas no nos atañe aquí. Concebir nuevas reglas que fueran plausibles y además cumplieran su cometido requirió una extraordinaria cantidad de inventiva. Como una dificultad adicional, Bohr acometió la incorporación, a su modelo atómico, de la nueva teoría cuántica de la radiación, que Max Planck había concebido y a la que Albert Einstein había dado un buen empleo. Por ello, durante el otoño de 1912 y el invierno de 1913, Bohr estuvo machacando ideas, replanteándose toda su trayectoria hacia la misma respuesta útil, primero por un camino y después por otro, nada más que para asegurarse de que sus argumentos eran dignos de confianza. Finalmente, en marzo, había concluido su primera memoria; en abril estaba lista para el editor, y en julio apareció. Trataba enteramente (y de un modo exitoso) del átomo de hidrógeno, al cual Bohr consideró constituido por un electrón que giraba alrededor de un núcleo único y pesado.

Su memoria siguiente, de dos meses después, trataba los problemas que planteaban los átomos más complicados. Una cantidad de electrones requeriría, por supuesto, un número igual de cargas positivas en el núcleo para mantener neutro al átomo, pero todo el mundo hacía conjeturas acerca de cuántos electrones podría haber en un átomo de nitrógeno, o de estaño, o de uranio. La hipótesis más difundida era

la de J. J. Thomson, de que el número de electrones era igual a la mitad del peso atómico, pero Bohr se decidió por otra diferente. En Holanda vivía un científico aficionado, llamado Van den Broek, que había estudiado abogacía y se había enamorado de la Tabla Periódica de los químicos. Estaba siempre a la búsqueda de alguna regla fundamental, pero sencilla, que pudiera explicarlo todo de un manotón. Ahora bien, Rutherford había sugerido una vez, nada más que para ser lógicamente completo, que medio átomo de helio tendría que tener la misma razón de carga a masa que una partícula alfa, y Van den Broek había echado mano de aquél como del 'ladrillo' ideal para construir todos los elementos. Como tenía carga uno (en la escala de los electrones) y peso atómico dos, daba directamente la regla de Thomson para el número de electrones de un átomo, y además, como lo mostrarían algunos cálculos aritméticos minuciosos, en promedio todos los pesos atómicos serían pares.

Sus argumentos eran fantásticos, pero una parte de la idea parecía promisoria, y Bohr propuso asignar a cada átomo su cuota de electrones numerando los elementos en el orden con que estaban en la Tabla Periódica, y haciendo que el número de orden de cada elemento fuera el número de electrones de cada uno de sus átomos. De este modo se le asignaría un electrón al hidrógeno, dos al helio (de modo que una partícula alfa sería un núcleo desnudo), tres al litio, cuatro al berilio, y así de seguido.

El núcleo cargaba con casi toda la masa del átomo, pero era inimaginablemente pequeño, y esto lo hacía estar remotamente alejado de las partes más exteriores del átomo. Como Bohr lo señalara, serían estas partes exteriores las que darían al átomo su comportamiento químico o la particular estructura de su es-

pectro. De este modo, estas cualidades de un átomo dependerían solo de la disposición de los electrones alrededor de sus fronteras exteriores, y esta disposición dependería fundamentalmente del número de electrones en conjunto. Con todo, átomos que se mostraran químicamente semejantes, que tuvieran igual número de electrones, podrían sin embargo tener núcleos de masas diferentes y diversos tipos de radiactividad, aun cuando tuvieran el mismo número de cargas positivas. El átomo provisto de un núcleo explicaba muy elegantemente la existencia de isótopos.

El mismo argumento condujo aún más lejos. Si un núcleo perdía una partícula alfa como consecuencia de su radiactividad, dicha partícula se llevaba consigo dos unidades de carga positiva. El hecho de tener dos unidades de carga menos en el nuevo núcleo, y dos electrones menos moviéndose alrededor de él, ubicaban al nuevo átomo dos lugares antes en la Tabla Periódica, precisamente en el lugar que la regla de Soddy establecía. Si un núcleo perdía una partícula beta —es decir, un electrón negativo— aumentaría su carga positiva en una unidad, y el nuevo elemento tendría que colocarse un lugar más adelante en la Tabla Periódica, tal como Fajans y Soddy habían dicho que sucedería.

En 1913 el nuevo átomo, que Rutherford había puesto en marcha y Bohr estaba mejorando, parecía lleno de promesas. Daba una explicación del espectro del hidrógeno, y podía esperarse que hiciera otro tanto con los demás elementos una vez que pudieran ser determinados los detalles de la disposición de los electrones. Había dejado entrever una razón para aquella completa separación entre la química corriente y la radiactividad, sobre la que Rutherford y Soddy habían insistido cuando propusieron por vez primera

su teoría de la transmutación, en 1902. Había localizado la radiactividad de los átomos en sus núcleos, y ahora era evidente que, por más diminutos y lejanos que fueran, estos núcleos tenían que ser explorados si se quería comprender alguna vez la radiactividad.

Éste es, pues, el lugar indicado para interrumpir nuestra historia. No todos los problemas de la radiactividad estaban resueltos aún, pero la atención iría pasando de las investigaciones que hemos encontrado aquí a otras de un tipo diferente. El futuro habría de estar en la física nuclear; pero aún queda, sin embargo, un capítulo más.

Capítulo 17

Un 'Post Scriptum' acerca del plomo

En 1913, los mundos de la radiactividad y de la química seguían siendo mundos aparte. Para el químico corriente que no había seguido el intrincado eslabonamiento de argumentos y experimentos, la teoría de la transmutación parecía fantástica y fantaseosa, excesivamente especulativa para ser creída. Sin embargo, ahora, los químicos más 'científicos' de todos, aquellos que trabajaban con números de la mayor precisión, los expertos en pesos atómicos, iban a proporcionarle a dicha teoría otra resonante confirmación.

En las cadenas de transmutaciones que comenzaban con el uranio y el torio, los últimos elementos radiactivos eran el radio F (o polonio) y el torio D. Las nuevas reglas de Fajans y de Soddy exigían que el radio G y el torio E, en los que aquéllos se transmutaban, fueran ambos isótopos del plomo. Más aún, la sustracción de los pesos correspondientes a las partículas alfa bastaba para mostrar que el radio G tendría que ser un plomo de peso atómico 206 (o un poco menos), y el torio E un plomo de peso atómico 208 (y algo más). El peso atómico del plomo común

era de poco más de 207, a mitad de camino entre los anteriores.

El radio G y el torio E habían ido acumulándose en los minerales por lo menos desde que dichos minerales entraron a formar parte de las rocas, y en la actualidad tendrían que ser encontrados allí en cantidades bastante apreciables. Entonces, si se pudiera hallar un mineral de uranio sin mucho torio, y un mineral de torio sin mucho uranio, y si ninguno de ellos estuviera muy contaminado con plomo común, se podrían obtener algunos pesos atómicos notables recurriendo sólo a la química corriente.

Puesto que el argumento era tan sencillo, no es sorprendente que una gran cantidad de gente emprendiera simultáneamente la tarea. En Glasgow, Soddy comenzó, junto con un asistente llamado Hyman, a purificar el plomo de una torita proveniente de Ceylán. En París, Maurice Curie, hijo del hermano de Pierre Curie, Jacques, inició el mismo trabajo con una cantidad de minerales. En Karlsruhe, Fajans era más cauteloso. Conocía la envergadura de la labor exigida para las mediciones de pesos atómicos, y, creyendo que era mejor dejarla a los expertos, envió a uno de sus alumnos, llamado Max Lembert, a través del Atlántico hasta el laboratorio de T. W. Richards, en Harvard, junto con dos muestras de plomo sin refinar, una extraída de una carnotita de Colorado, y la otra, de la pecblenda de Joachimsthal. Finalmente, en Praga, que por aquel entonces era una ciudad de Austria, Otto Hönigschmid, un químico que había estudiado con Moissan y con Richards, se puso a investigar, junto con una asistente llamada Stefanie Horovitz, el plomo extraído de los residuos de Joachimsthal.

Pero en el verano de 1914, todos ellos estaban listos para informar. En experimentos preliminares.

y con demasiado poco material como para lograr precisión, Soddy y Hyman obtuvieron los pesos atómicos 208,3 y 208,5 para el plomo extraído del torio. Para el extraído de los minerales de uranio aparecía una variedad de valores. Richards y Lembert obtuvieron un máximo de 206,86 para el plomo obtenido de una pecblenda inglesa que le había sido enviada por Ramsay; Hönigschmid y Horovitz estaban en el medio con 206,736; Maurice Curie obtuvo un mínimo de 206,36; y todavía había otros cinco valores intermedios.

Para un radioquímico experto todo esto era suficientemente razonable. Ninguna de las muestras de uranio había contenido radio G puro, pero, en todo caso, suficiente cantidad de ese plomo recién nacido había estado presente en forma de mezcla, como para llevar el peso atómico de toda la masa bien por debajo del valor corriente. Para Richards, sin embargo, esto era completamente sorprendente. Él había convertido en escépticos a los químicos de Harvard. Ellos se negaban a admitir que el peso atómico de la plata, del sodio, o del hierro, no fuera siempre el mismo, sin insistir en hacer comprobaciones con muestras de estos elementos provenientes de los cuatro puntos cardinales del globo. Hasta entonces habían tenido siempre por un hecho experimental el que, cualquiera que fuese el lugar en que se había recogido el material, el peso atómico de un elemento nunca se apartaba de un valor único, idéntico. Ahora, sin embargo, Richards había visto ocho pesos atómicos diferentes y dignos de confianza, correspondientes a ocho muestras distintas, cada una de las cuales estaba constituida, fuera de toda duda, por plomo de la más absoluta pureza. Y entonces se dio con tremendo vigor a la tarea de descubrir si el

plomo común y el radio G podían diferir en alguna otra propiedad aparte de su peso.

A fines de 1915 había obtenido plomo de un mineral australiano que era decididamente menos denso que el plomo común. A mediados de 1916 poseía plomo extraído de algunos cristales de cleveita muy pura, enviados desde Noruega por una radioquímica llamada Ellen Gleditsch, que había trabajado con Boltwood en New Haven solo unos pocos años antes. Era aún menos denso que el de la muestra australiana, y cuando, en el otoño de 1916, Richards hubo determinado sus pesos atómicos, el plomo australiano dio 206,34 y el noruego 206,08.

Esto en cuanto a la diferencia, pero las semejanzas eran bastante más interesantes. Las densidades del plomo común y del de las muestras australiana y noruega resultaron ser estrictamente proporcionales a sus pesos atómicos. Esto significaba que los átomos del radio G y los del plomo común tenían exactamente el mismo volumen. También tenían, como Richards lo descubriría dentro de los dos años siguientes, el mismo espectro, la misma solubilidad en agua y, los cristales de sus nitratos, el mismo índice de refracción. Eran tan idénticos como Soddy había pensado que tendrían que ser los isótopos, y como el nuevo átomo de Bohr sugería que debían ser. La teoría de la radiactividad y la nueva física a la que estaba dando origen difícilmente podrían haber tenido una prueba más exigente.

En el ínterin, en 1915, Hönigschmid y Horovitz habían hallado radio G puro. Poseían una uraninita proveniente de un lugar llamado Morogoro, en lo que era el África Oriental Alemana, cuyo plomo tenía un peso atómico de 206,04. De Noruega habían obtenido una bröggerita que daba 206,06. No podía

haber duda alguna de que el uranio se transformaba finalmente en una variedad liviana del plomo.

Qué resultaba del torio era un problema mucho más difícil. Excepto en el caso del trabajo preliminar de Soddy y Hyman, la mayor parte del plomo extraído de minerales de torio evidenciaba un peso atómico menor que el del plomo común. Esto se debía a que los minerales de torio contenían grandes cantidades de uranio, y éste se transmutaba tres o cuatro veces más rápidamente que el torio. Con todo, condujo a la sospecha de que el torio E pudiera tener una lenta radiactividad residual, y de que el final de la cadena del torio pudiera ser, entonces, un isótopo del talio o del bismuto. Pero estos elementos eran notablemente escasos en la mayoría de los minerales de torio. Entonces Soddy extrajo una cierta cantidad de plomo de la torita de Ceylán y lo envió a Hönigschmid, quien en 1916 anunció que tenía un peso atómico de 207,77. (En ese entonces, Soddy estaba en Aberdeen y Hönigschmid en Praga. Es interesante que haya podido mantenerse entre ellos una comunicación científica mientras Gran Bretaña y Austria estaban en guerra.) Luego siguió Fajans con plomo extraído de una torita noruega muy pura, y para éste halló Hönigschmid un valor de 207,90. Por fin el torio E podía ocupar su lugar junto al radio G. Cada uno tenía su peso atómico particular, y aunque ninguno era el material corrientemente empleado por los plomeros, químicamente hablando ninguno podía ser calificado de otra cosa que de plomo.

Capítulo 18

Fin

Los isótopos y el átomo con su núcleo, rayos alfa y beta penetrantes que en realidad eran corrientes de partículas atómicas, transmutaciones por docena yendo libremente de aquí para allá a través de diez lugares de la Tabla Periódica, todas estas cosas eran muy diferentes del primer sueño de Becquerel de obtener rayos X por medio de la luz natural. Nadie pudo haber entrevisto qué es lo que vendría después de la mancha grisácea que se oscurecía lentamente sobre su placa fotográfica. Aun así, todo el camino que va desde esta placa hasta el peso atómico del torio E lo ha recorrido el lector siguiendo un rastro continuo. Cada idea nueva ha sido consecuencia de una anterior; cada experimento original, sugerido por algo ya conocido.

Los avances de la ciencia son continuos, pero es necesario decir nuevamente que no son predecibles. Los rayos alfa parecían carentes de importancia debido a su escaso poder de penetración, y, sin embargo, proporcionaron una evidencia espectacular de la transmutación, hicieron posible la predicción de la naturaleza química del radio G, y condujeron a

Rutherford a las profundidades del corazón del átomo. El radio era el atrayente nuevo elemento, pero fue el vulgar torio quien dio la clave de la teoría de la transmutación. Tanto McCoy y Boltwood como Hahn y Marckwald eran químicos muy dotados, que llevaron a cabo grandes cosas, pero fueron los desaciertos de Soddy los que lo llevaron, a él mismo, a ver isótopos en todas las semejanzas que ellos habían puntualizado.

Todavía hay algo más que debemos considerar. Habíamos prometido al comienzo que esta sería una historia de la física atómica, y es bien poco lo que sobre física atómica hemos dicho en el transcurso de nuestro recorrido. Así es como tenía que ser. La física atómica, como una rama especial de la ciencia, comenzaría donde nosotros hemos concluido el relato: con los primeros éxitos del modelo atómico de Rutherford y Bohr. Lo que aquí hemos estado siguiendo en su desarrollo, no era más que una preparación para lo otro.

Resulta fácil hablar acerca de perros, porque se los ha visto y tocado, se ha jugado con ellos, y quizás se les ha dado de comer o se ha escapado de ellos. Se tiene todo tipo de experiencias para adosar a las cinco letras p-e-r-r-o. Si, en cambio, se hablara de animales tan interesantes como un celacanto o un pangolín, resultaría que una vez que se hubiera aprendido a deletrear sus nombres quedaría muy poco por decir. Para proseguir habría que descubrir si viven sobre los árboles o en cuevas bajo la tierra, si tienen plumas o pelos, si mudan sus astas o las conservan. Habría que integrar un cuadro de experiencias acerca de ellos.

Éste fue el modo en que las cosas ocurrieron con los átomos. En la época en que esta historia comenzó, el 'átomo' era una idea vaga, tan borrosa e indefinida como lo son quizás para el lector aquellos extraños animales. Solo fue en forma muy gradual que la idea de átomo se volvió de utilidad. La teoría de la ionización de los gases de J. J. Thomson era fácilmente formulable con el lenguaje de los átomos. Rutherford y Soddy necesitaban de los átomos para describir las transmutaciones, y cuando imaginaron que una partícula alfa o una beta era emitida en el instante en que el átomo se transformaba, las transmutaciones mismas se convirtieron en actos atómicos, tan distanciados y aislados en el tiempo como se habría de considerar que lo estaban los propios átomos en el espacio. Rutherford calculaba el número de átomos aun antes de estar en condiciones de contarlos, pero las oscilaciones de la aguja de su electrómetro y los destellos de su pantalla de centelleo difícilmente podrían haber sido considerados de otra manera. No había habido ningún momento en que se pudiera decir: "Miren, aquí el átomo se tornó real". Más que nada, los átomos se volvían reales al ser usados para describir los resultados de un experimento después del otro.

No vaya a pensar el lector, ni por un momento siquiera, en que ahora conoce el átomo 'real'. El átomo es una idea, una teoría, una hipótesis; es todo lo que se necesita para explicar los hechos de la experiencia. Muchas cosas han sucedido después del punto en que concluimos esta historia, y el átomo ha ido cambiando para mantenerse al día. Muchas cosas sucederán en el futuro, y los cambios en el átomo continuarán. En ciencia, recordémoslo, una idea solo dura hasta tanto conserva su utilidad.

Quién es quién en este libro*

BARNES, HOWARD T. (1873-1950): Profesor asociado de física en la Universidad de McGill, Montreal, donde sucedió a Rutherford como profesor de física.

BARTHÉLEMY: Físico francés.

BECQUEREL, HENRI (1852-1908): Profesor de física en el Museo de Historia Natural y en la *École Polytechnique* de París. Premio Nobel de Física en 1903, compartido con los Curie.

BEGEMAN, LOUIS: Estudiante-graduado en la Universidad de Chicago; después profesor de física y química en el *Iowa State Teachers College,* Cedar Falls.

BÉMONT, GUSTAVE: Instructor de laboratorio de química en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales, París.

* Muchos de los cargos docentes y títulos universitarios que se mencionan en este apéndice —todos en inglés en el libro original, incluso los no anglosajones— han debido ser traducidos en forma convencional, ya que no tienen su equivalente en los países de habla española. Es el caso de 'profesor-conferenciante' *(lecturer)*, 'estudiante-graduado' *(graduate student)*, 'expositor' *(reader)*, etc. (N. del T.)

Blanc, Gian Alberto: Profesor-conferenciante de física; después profesor de geoquímica en la Universidad de Roma.

Bohr, Niels (1885-1962): Físico danés; después profesor de física teórica en la Universidad de Copenhague. Premio Nobel de Física en 1922.

Boltwood, Bertram B. (1870-1927): Químico--investigador en New Haven, Connecticut. Profesor asistente de física, luego profesor de radioquímica en la Universidad de Yale.

Callendar, Hugh Longbourne (1863-1930): Profesor de física en la Universidad de McGill, Montreal, y, posteriormente, en el *Imperial College of Science and Technology*, Londres.

Crookes, William (1832-1919): Químico-consultor en Londres, propietario y editor de *The Chemical News;* nombrado caballero en 1897.

Curie, Jacques (1856-1941): Profesor-conferenciante de mineralogía y posteriormente profesor en la Universidad de Montpellier, Francia. Hermano de Pierre Curie y padre de Maurice Curie.

Curie, Marie (1867-1934): Esposa de Pierre Curie, a quien sucedió como profesora de física en la Universidad de París. Premio Nobel de Física en 1903, compartido con Becquerel, y de Química en 1911.

Curie, Maurice (1888-): Estudió la radiactividad en París; después fue profesor de física de laboratorio en la Universidad de París. Hijo de Jacques Curie.

Curie, Pierre (1859-1906): Profesor de física en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales, París; después profesor de física en la Universidad de París. Premio Nobel de Física en 1903, compartido con Becquerel

Debierne, André (1874-): Instructor de laboratorio de química; después profesor de química en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales, París, y, posteriormente, en la Universidad de París.

Demarçay, Eugène (1852-1904): Químico-investigador que sostenía un laboratorio privado en París.

Deslandres, Henri (1853-1948): Astrónomo del Observatorio de Astrofísica de Meudon, cerca de París.

Dewar, James (1842-1923): Profesor de química en la *Royal Institution*, Londres; nombrado caballero en 1904.

Dorn, Ernst (1848-1916): Profesor de física en la Universidad de Halle, Alemania.

Einstein, Albert (1879-1955): Inspector de la Oficina de Patentes de Suiza, en Berna; después profesor de física en las universidades de Zürich, Praga y Berlín, y en el *Institute for Advanced Study*, Princeton (Nueva Jersey). Premio Nobel de Física en 1921.

Exner, Franz (1849-1926): Profesor de física en la Universidad de Viena.

Fajans, Kasimir (1887-): Profesor-conferenciante de fisicoquímica en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Alemania; después profesor de física y química en la Universidad de Munich; luego profesor de química en la Universidad de Michigan.

Fischer, Emil (1852-1919): Profesor de química en la Universidad de Berlín. Premio Nobel de Química en 1902.

Fleck, Alexander (1889-): Estudió química

en la Universidad de Glasgow; en la actualidad es presidente de las *Imperial Chemical Industries.* Nombrado caballero en 1955.

FRANKLAND, EDWARD (1825-1899): Profesor en la *Royal Institution* y profesor de química en la Escuela de Minas, Londres.

GEIGER, HANS (1882-1945): Físico-investigador en la Universidad de Manchester, y, después, en la *Physikalische Technische Reichsanstalt,* Berlín; con posterioridad fue profesor de física en las universidades de Kiel y Tübingen.

GIESEL, FRIEDRICH (1852-1927): Químico-investigador en la firma industrial *Buchler und Compagnie,* Braunschweig, Alemania.

GLEDITSCH, ELLEN (1879-): Asistente y después profesora de química en la Universidad de Oslo.

GREINACHER, HEINRICH (1880-): Asistente de física en la Universidad de Berlín; luego profesor de física en la Universidad de Berna.

GRIER, ARTHUR GORDON: Instructor de laboratorio de física en la Universidad de McGill, Montreal.

HAHN, OTTO (1879-): Profesor-conferenciante de química en la Universidad de Berlín; después director del Instituto de Química *Kaiser Wilhelm,* en Berlín. Premio Nobel de Química en 1944.

HASCHEK, EDUARD (1875-1947): Profesor-conferenciante y después profesor de física en la Universidad de Viena.

HERCHFINKEL, H.: Químico-investigador en la Universidad de París.

HERRMANN, KARL (1882- ?): Estudió en la Universidad de Berlín; después fue profesor asociado de fisicoquímica en el Instituto de Tecnología de Berlín.

HÖNIGSCHMID, OTTO (1878-1945): Investigador asociado de química en la Universidad Alemana de Praga; después profesor de Química en Münich.

HOROVITZ, STEFANIE: Química en la Universidad Alemana de Praga.

HYMAN, H.: Químico en la Universidad de Glasgow.

JANSSEN, PIERRE JULES CÉSAR (1824-1907): Director del Observatorio de Astrofísica de Meudon, cerca de París.

KEETMAN, BRUNO (1884-1918): Estudiante-graduado de química en la Universidad de Berlín; después director del laboratorio de radiactividad en la *Auer Gesellschaft,* Berlín.

KIRKBY, PAUL J. (1869- ?): Matemático en la Universidad de Oxford.

LABORDE, ALBERT: Físico en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales, París.

LECOQ DE BOISBAUDRAN, PAUL ÉMILE (1838-1912): Químico francés que sostenía un laboratorio privado en Cognac y, posteriormente, en París, y que prefería hacerse llamar François.

LEMBERT, MAX (? -1925): Estudió química y luego fue profesor asociado de química general e inorgánica en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Alemania.

LIPPMANN, GABRIEL (1845-1921): Profesor de física en la Universidad de París. Premio Nobel de Física en 1908.

LOCKYER, NORMAN (1836-1920): Astrónomo inglés, luego director del Observatorio de Física Solar de South Kensington. Nombrado caballero en 1897.

MCCOY, HERBERT N. (1870-1945): Profesor aso-

ciado y luego profesor de química en la Universidad de Chicago.

MACDONALD, WILLIAM C. (1831-1917): Industrial del tabaco, de Montreal, que proveyó a la Universidad de McGill de sus laboratorios científico y de ingeniería, los equipó, y subvencionó sus cátedras; nombrado caballero en 1898.

MARCKWALD, WILLY (1864- ?): Profesor de química en la Universidad de Berlín.

MARSDEN, ERNEST (1889-   ): Estudió en la Universidad de Manchester; luego fue profesor de física en el *Victoria University College*, Wellington (Nueva Zelandia), y, posteriormente, secretario del Departamento de Investigación Industrial y Científica, Nueva Zelandia. Nombrado caballero en 1958.

MENDELÉIEV, DMITRI IVANOVICH (1834-1907): Profesor de química general en la Universidad de San Petersburgo, en Rusia.

MEYER, STEFAN (1872-1949): Asistente de física, después profesor de física en la Universidad de Viena.

MILLIKAN, ROBERT A. (1868-1953): Profesor asociado de física en la Universidad de Chicago, donde luego fue profesor; posteriormente, profesor de física y presidente del Consejo Ejecutivo del Instituto de Tecnología de California. Premio Nobel de Física en 1923.

MOISSAN, HENRI (1852-1907): Profesor en la Escuela Avanzada de Farmacia, París. Premio Nobel de Química en 1906.

NILSON, LARS FREDRIK (1840-1899): Profesor de química analítica en la Universidad de Upsala, en Suecia.

OUDIN: Físico francés.

OWENS, ROBERT BOWIE (1870-1940): Profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de McGill, Montreal; después secretario del Instituto Franklin, Filadelfia.

PLANK, MAX (1858-1947): Profesor de Física en la Universidad de Berlín. Premio Nobel de Física en 1918.

POINCARÉ, HENRI (1854-1912): Profesor-conferenciante en la *Ecole Polytechnique* y en la Universidad de París; después profesor de matemática y astronomía en la Universidad.

RAMSAY, WILLIAM (1852-1916): Profesor de química en el *University College*, Londres; nombrado caballero en 1902. Premio Nobel de Química en 1904.

RAYLEIGH, JOHN WILLIAM STRUTT (LORD RAYLEIGH) (1842-1919): Físico-investigador, en una oportunidad profesor de física experimental en la Universidad de Cambridge. Premio Nobel de Física en 1904.

REGENER, ERICH (1881-1955): Físico-investigador en la Universidad de Berlín; luego profesor de física en el Instituto de Agricultura de Berlín, y, posteriormente, en el Instituto de Tecnología de Stuttgart, Alemania.

RICHARDS, THEODORE WILLIAM (1868-1928): Profesor de química en la Universidad de Harvard. Premio Nobel de Química en 1914.

RÖNTGEN, WILHELM CONRAD (1845-1923): Profesor de Física en la Universidad de Würzburg, Alemania, posteriormente en la Universidad de Munich. Premio Nobel de Física en 1901.

ROSS, WILLIAM HORACE (1875-1947): Estudiante-graduado de química en la Universidad de Chica-

go; después químico agrícola en el Estado de Arizona y en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

ROSSI, ROBERTO: Físico en la Universidad de Manchester.

ROYDS, THOMAS (1884-1955): Estudiante-investigador de física en la Universidad de Manchester; después director del Observatorio Kodaikanal, en Madrás, India.

RUBENS, HEINRICH (1865-1922): Profesor de física en la Universidad de Berlín.

RUSSELL, ALEXANDER SMITH (1868-): Químico-investigador en Glasgow, Berlín, Manchester; después profesor-conferenciante de fisicoquímica en la Universidad de Sheffield, y, posteriormente, expositor de química en la Universidad de Oxford.

RUTHERFORD, ERNEST (1871-1937): Estudiante--investigador en la Universidad de Cambridge, profesor de física en la Universidad de McGill, Montreal, en la Universidad de Manchester, y en la de Cambridge. Nombrado caballero en 1914, y convertido en Lord Rutherford en 1931. Premio Nobel de Química en 1908.

SCHUSTER, ARTHUR (1851-1934): Profesor de física en la Universidad de Manchester; después secretario de la *Royal Society*. Nombrado caballero en 1920.

SCHWEIDLER, EGON RITTER VON (1873-1948): Profesor-conferenciante de fisicoquímica, después profesor, en la Universidad de Viena.

SODDY, FREDERICK (1877-1956): Instructor de laboratorio de química en la Universidad de McGill, Montreal; luego profesor-conferenciante de fisicoquímica en la Universidad de Glasgow, y, posteriormente, profesor de química en la Universidad

de Aberdeen y en la de Oxford. Premio Nobel de Química en 1921.

SZILARD, BELA: Químico en la Universidad de París.

THOMSON, J. J. (1856-1940): Profesor de física en la Universidad de Cambridge; nombrado caballero en 1908. Premio Nobel de Física en 1906.

TOWNSEND, JOHN S. (1868-1957): Estudiante-investigador en la Universidad de Cambridge; luego profesor de física en la Universidad de Oxford. Nombrado caballero en 1941.

VAN DEN BROEK, ANTONIUS JOHANNES (1870-1926): Maestro privado de física en Noordwyk, Holanda.

WELSBACH, CARL AUER VON (1858-1929): Químico austríaco, inventor del mechero que lleva su nombre.

WILSON, HAROLD ALBERT (1874-): Estudiante-investigador de física en la Universidad de Cambridge; luego profesor de física en el *King's College*, Londres, en la Universidad de McGill, Montreal, en la Universidad de Glasgow, y en el *Rice Institute*, Houston (Texas).

WINKLER, CLEMENS (1838-1904): Profesor de química en la Escuela de Minas de Freiberg, Alemania.

Origen de los nombres y símbolos de los elementos*

Ac actinio, 1900; del griego *aktís,* rayo.

Al aluminio, 1825; del latín *alumen,* alumbre, sustancia astringente.

Am americio, 1944; en homenaje a América, donde fue descubierto.

Sb antimonio, siglo XV; del griego *antímonos,* opuesto a la soledad, puesto que el antimonio siempre está asociado con otros minerales; el símbolo proviene del latín *stibium,* antimonio.

A argón, 1894; del griego *argós,* neutro o inactivo.

As arsénico, siglo XIII; del griego *arsenikón,* varonil o valiente, por su acción sobre otros metales.

At astato, 1940; del griego *ástatos,* inestable.

S azufre, prehistórico; del latín *sulphur,* azufre.

Ba bario, 1808; del griego *barýs,* pesado.

* Las fechas se refieren a la de aislación del elemento, cuando ésta es conocida; en caso contrario. a la de su descubrimiento. [N. del T.: Este apéndice ha debido ser adaptado para responder al diverso origen que los nombres de algunos elementos tienen en inglés y en español. Además se han hecho algunas correcciones y cambios necesarios.]

Be berilio (glucinio), 1797; así llamado por el mineral berilo (en griego, *béryllos*).

Bk berkelio, 1949; en homenaje a la ciudad de Berkeley, California.

Bi bismuto, siglo XV; del alemán *weisse Masse*, masa blanca; los mineros lo llamaban *wismut*, y se convirtió en *bismat* al latinizarse.

B boro, 1808; del árabe *bauraq*, bórax o nitro, o del persa *búrah*, blanco.

Br bromo, 1826; del griego *bromos*, hedor.

Cd cadmio, 1817; del latín *cadmia*, calamina (un mineral de cinc).

Ca calcio, 1808; del latín *calx*, cal.

Cf californio, 1950; en homenaje al Estado y a la Universidad de California.

C carbono, prehistórico; del latín *carbo*, carbón.

Ce cerio, 1804; así llamado por el asteroide Ceres, descubierto en 1801.

Cs cesio, 1860; del latín *caesius*, azul celeste, por las dos rayas azules de su espectro.

Zn cinc (zinc), prehistórico; del alemán *Zink*, parecido a *Zinn*, estaño.

Zr circonio (zirconio), 1824; del árabe *zarqún*, cerusa roja, minio.

Cl cloro, 1808; del griego *khlorós*, verde intenso.

Co cobalto, 1735; del griego *kóbalos*, duende.

Cu cobre, prehistórico; del latín *cuprum*, cobre, que a su vez proviene del nombre griego de Chipre, *Kypros*, de donde se obtenían grandes cantidades de este metal.

Kr criptón, 1898; del griego *kryptós*, oculto.

Cr cromo, 1797; del griego *khroma*, color, por el uso que de él se hace como pigmento.

Cm curio, 1944; en homenaje a Marie y Pierre Curie.

Dy disprosio, 1886; del griego *dysprósitos*, difícil de obtener.

E einstenio, 1952; en homenaje a Albert Einstein.

Er erbio, 1843; así llamado por Ytterby, pueblo de Suecia.

Sc escandio, 1879; nombre que le fue dado, por su descubridor sueco, en homenaje a la Península Escandinava.

Sn estaño, prehistórico; del latín *stannum*, plomo argentífero, estaño.

Sr estroncio, 1808; así llamado por Strontian, pueblo de Escocia.

Eu europio, 1900; en homenaje a Europa.

Fm fermio, 1953; en homenaje a Enrico Fermi.

F flúor, 1886; del latín *fluere*, fluir.

P fósforo, 1669; del griego *phosphoros*, portador de luz.

Fr francio, 1939; en homenaje a Francia, patria de su descubridor.

Gd gadolinio, 1886; en homenaje a J. Gadolin, químico finlandés.

Ga galio, 1875; en homenaje a la Galia, o Francia.

Ge germanio, 1886; en homenaje a la Germania, o Alemania.

Hf hafnio, 1922; de *Hafnia*, nombre latino de Copenhague.

He helio, 1895; del griego *helios*, el Sol.

H hidrógeno, 1766; del griego *hýdor*, agua, y *gennao*, engendrar (es decir 'que engendra agua').

Fe hierro, prehistórico; del latín *ferrum*, hierro.

Ho holmio, 1879; de *Holmia*, nombre latinizado de Estocolmo, cerca de la cual hay muchos minerales del grupo de las tierras raras.

In indio, 1863; así llamado por la línea azul-índigo de su espectro.

Ir iridio, 1804; del latín *iris*, arco iris; recibió este nombre debido al color iridiscente de sus sales

Yb iterbio, 1905; así llamado por Ytterby, pueblo de Suecia.

Y itrio, 1843; así llamado por Ytterby, pueblo de Suecia.

La lantano, 1839; del griego *lanthano*, estar oculto.

Li litio, 1817; del griego *lithos*, piedra.

Lu lutecio, 1905; de *Lutetia*, antiguo nombre de París.

Mg magnesio, 1808; del latín *magnesia*, mineral parecido a la piedra imán (*magnes*), que se encontraba en *Magnesia*, región del Asia Menor.

Mn manganeso, 1774; forma corrupta del nombre latino *magnesia*, manganesa.

Mv mendelevio, 1955; en homenaje a Dmitri Mendeléiev, que creó la Tabla Periódica.

Hg mercurio, prehistórico; del latín *Mercurius*, el dios y el planeta; el símbolo proviene del griego *hydrárgyros*, hidrargiro o 'plata líquida'.

Mo molibdeno, 1782; del griego *mólybdos*, plomo.

Nd neodimio, 1885; del griego *neós*, nuevo, y *dídymos*, mellizo.

Ne neón, 1898; del griego *neós*, nuevo.

Np neptunio, 1940; así llamado por el planeta Neptuno.

Nb niobio (colombio), 1801; así llamado por Níobe, hija de Tántalo, puesto que siempre se lo encuentra asociado con el tantalio.

Ni níquel, 1750; del alemán *Nickel*, duende o demonio.

N nitrógeno, 1772; del griego *nítron*, soda natural o nitro, y *gennao*, engendrar.

No nobelio, 1957; en homenaje a Alfred Nobel.

Au oro, prehistórico; del latín *aurum*, oro.

Os osmio, 1804; del griego *osmé*, olor, alude al olor de su tetróxido volátil.

O oxígeno, 1774; del griego *oxýs*, agudo o ácido, y *gennao*, engendrar.

Pd paladio, 1803; así llamado por el planetoide Pallas, descubierto en 1801.

Ag plata, prehistórico; del bajo latín *plata*, lámina de metal; el símbolo proviene del nombre latino *argentum*.

Pt platino, 1735; de *platina* (derivado de plata), antiguo nombre del platino.

Pb plomo, prehistórico; del latín *plumbum*, plomo.

Pu plutonio, 1940; así llamado por Plutón, el segundo planeta después de Urano, puesto que es el segundo elemento transuránico.

Po polonio, 1898; en homenaje a Polonia, la patria de su descubridora.

K potasio, 1807; del alemán *Pottasche*, potasa o 'ceniza de olla' (alusión a la forma en que se la obtenía antiguamente); el símbolo proviene del latín *kalium*.

Pr praseodimio, 1885; del griego *prásios*, verde como el puerro, y *dídymos*, mellizo.

Pm prometio (ilinio), 1947; así llamado por Prometeo, que llevó el fuego a los hombres, según la mitología griega.

Pa protactinio, 1917; del griego *prótos*, primero, y de actinio, puesto que al desintegrarse se transforma en este elemento.

Ra radio, 1898; del latín *radius*, rayo.

Rn radón (radioemanación), 1900; así llamado por provenir del radio.

Re renio, 1924; así llamado por la Provincia Renana de Alemania (*Rhenus* en latín).

Rh rodio, 1804; del griego *rhodon*, rosa, alude al color de las soluciones acuosas de sus sales.

Rb rubidio, 1860; del latín *rubidus*, rojo.

Ru rutenio, 1845; así llamado por Rusia (*Ruthenia* en latín).

Sm samario, 1879; en homenaje a Samarsky, un ingeniero ruso.

Se selenio, 1817; del griego *selene*, la Luna.

Si silicio, 1823; del latín *silex*, pedernal.

Na sodio, 1807; del latín medieval *soda;* el símbolo proviene del latín *natrium*.

Tl talio, 1862; del griego *thallós*, retoño.

Ta tantalio, 1802; así llamado por Tántalo, el personaje de la mitología griega, debido a que el metal era difícil de aislar y ello constituía un suplicio, como el de Tántalo.

Tc tecnecio (masurio), 1937; del griego *tekhnetós*, artificial, puesto que fue el primer elemento obtenido artificialmente.

Te telurio, 1782; del latín *tellus*, la Tierra.

Tb terbio, 1843; así llamado por Ytterby, pueblo de Suecia.

Ti titanio, 1791; así llamado por los Titanes de la mitología griega, hijos de la Tierra (Gea) y del Cielo (Urano), por haber sido descubierto después del uranio, por la misma persona.

Th torio, 1819; así llamado por el dios Thor, de la mitología escandinava.

Tm tulio, 1879; del nombre latino *Thule*, dado por los romanos a la parte más septentrional del mundo habitado.

W tungsteno (volframio), 1783; del sueco *tung sten*, piedra pesada; el símbolo proviene del segundo nombre, *Wolfram* en alemán (de *Wolf*, lobo, y *Rahm*, crema o espuma; en latín *spuma lupi*).

U uranio, 1789; así llamado por el planeta Urano.

V vanadio, 1830; así llamado por la diosa Vanadis de la mitología escandinava.

Xe xenón, 1898; del griego *xenos*, extraño.

I yodo (iodo), 1811, del griego *iodes*, violáceo.

Bibliografía

DONALD J. HUGHES, *The Neutron Story*, Doubleday Anchor Books, 1959. [Trad. esp.: *Historia del neutrón*, Buenos Aires, EUDEBA, colec. Ciencia Joven, 1960.]

Trata acerca de una parte de la física que se desarrolló en el período que viene a continuación del que abarca este libro.

SELIG HECHT, *Explaining the Atom*, Viking Press, 1948, edición revisada: 1954. [Trad. esp.: *El secreto de la bomba atómica*, Santiago de Chile, Zig-Zag, 1948.]

Otra buena reseña de la física nuclear más reciente.

PATRICK M. HURLEY, *How Old Is the Earth?*, Doubleday Anchor Books, 1959. [Trad. esp.: *¿Qué edad tiene la Tierra?*, Buenos Aires, EUDEBA, colec. Ciencia Joven, 1960.]

Los isótopos y la radiactividad empleados para estudiar la historia de la Tierra.

FREDERICK SODDY, *The Interpretation of Radium and the Structure of the Atom*, G. P. Putnam's Sons, 1922, 4ª edición.

Obra basada en una serie de conferencias dadas en la Universidad de Glasgow en 1908, y actualizadas en 1920.

ALFRED ROMER (compilador), *Radioactivity: The Transformation of Elements* y *Radiochemistry and the Discovery of Isotopes*, Dover Publications, Classics of Science Series. (En preparación.)

En estas obras se reproducen las memorias originales sobre algunas de las investigaciones más importantes descriptas en este libro.

Indice alfabético

Indice

La presente edición se terminó de imprimir en el mes de Marzo de 1977 en los talleres de GRAFICA PATRICIOS S.C.A., Juan Gregorio Lemos 246, Buenos Aires, Argentina.